Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

+ *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.

+ *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.

+ *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.

+ *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página `http://books.google.com`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

ELEKTRIZITÄT
UND
MAGNETISMUS

THOMPSON

Digitized by Google

Digitized by Google

Nat. V 2

Digitized by Google

Digitized by Google

ELEMENTARE VORLESUNGEN

ÜBER

ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

VON

SILVANUS P. THOMPSON

PROFESSOR DER PHYSIK AM TECHNICAL COLLEGE ZU LONDON.

AUTORISIERTE DEUTSCHE ÜBERSETZUNG

AUF GRUND DER NEUESTEN (28.) AUFLAGE DES ORIGINALS

VON

DR. A. HIMSTEDT

TÜBINGEN 1887

VERLAG DER H. LAUPP'SCHEN BUCHHANDLUNG.

Digitized by Google

Druck von H. Laupp jr. in Tübingen.

Digitized by Google

VORREDE DES VERFASSERS.

Diese Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus haben den Zweck, Anfängern eine klare und genaue Kenntnis zu verschaffen von den Experimenten, auf welchen die Lehre von der Elektrizität und vom Magnetismus basiert ist, sowie von den exakten Gesetzen, welche dabei entdeckt worden sind. Die Schwierigkeiten, auf welche Anfänger beim Studium vieler neueren Lehrbücher stossen, rühren teils her von dem ausserordentlich grossen Umfange des Gegenstandes, teils aber auch von einer zu geringen Vertrautheit der betreffenden Leser mit den einfachen Fundamentalversuchen. Wir haben gleich von anfang an drei verschiedene Gruppen von Erscheinungen zu betrachten, nämlich die der Reibungselektrizität, die des elektrischen Stromes und die des Magnetismus, und doch ist es unmöglich, irgend eine dieser Gruppen gründlich zu studieren, ohne wenigstens etwas schon von jeder derselben zu kennen. Deshalb geben die drei ersten Kapitel dieses Werkes lediglich eine einfache Beschreibung der wichtigsten experimentellen Fakta aller drei Gruppen und erst in den späteren Kapiteln wird der Zusammenhang der Gruppen unter einander behandelt und werden diejenigen Sätze aus der Elektrizitätslehre gegeben, welche in einem **streng elementaren** Buche zulässig erscheinen. Von der Algebra wird nur die Kenntnis der Gleichungen ersten Grades, von der Geometrie nur das erste Buch des Euclid als bekannt vorausgesetzt.

Digitized by Google

Am Ende des Buches findet sich eine Reihe von Uebungsbeispielen und Aufgaben, welche dem Leser die Anregung geben sollen, über das Gelesene weiter nachzudenken und ihm die Möglichkeit bieten, durch Beantwortung der Fragen und Bearbeitung der Aufgaben sich darüber klar zu werden, bis zu welchem Grade er das Gelesene verdaut und zu seinem Eigentum gemacht hat.

Ueberall, wo es sich darum handelte, elektrische Grössen zu messen, haben wir uns ausschliesslich des jetzt auch in der Praxis eingeführten Systems der elektrischen Einheiten bedient, indem wir ein Volt, ein Ohm, ein Ampère bezüglich als Einheiten der elektromotorischen Kraft, des Widerstandes und der Stromstärke gebrauchten. Der Verfasser hat dies um deswillen gethan, weil die Erfahrung ihn gelehrt hat, dass wer immer anfängt sich mit der Elektrizitätslehre zu beschäftigen, gar bald mit diesen Einheiten vertraut wird und dann stets eine ganz bestimmte konkrete Vorstellung damit verbindet, was bei den rein abstrakten Einheiten nicht der Fall ist. Ausserdem aber hofft der Verfasser, dass seine Vorlesungen dadurch von grösserem Nutzen sein können für jüngere Telegraphenbeamte, die, mit jenen Einheiten schon vertraut, von der Elektrizitätslehre etwas mehr erfahren wollen, als das, was in den engen Grenzen ihres praktischen Berufes liegt. — Bei der Lektüre dieses kleinen Werkes darf der Leser nicht vergessen, dass dasselbe nur die Einleitung in eine Wissenschaft von sehr grossem Umfange ist. Diejenigen, welche nicht bei den ersten Anfängen stehen bleiben wollen, müssen deshalb die grösseren Werke von Faraday, Maxwell, Thomson, Wiedemann, Maskart u. a. zu Rate ziehen, auch eventuell Spezialwerke studieren, welche von den verschiedenen technischen Anwendungen der Elektrizitätslehre auf Künste und Gewerbe handeln.

Obwohl der Verfasser es nicht für angemessen erachtet, in einem elementaren Lehrbuche die verschiedenen Theorieen über die Natur der Elektrizität zu besprechen, da über dieselben

Digitized by Google

ja die grössten Autoritäten noch nicht einig geworden sind, so hält er es doch zum besseren Verständnis des Buches für zweckdienlich, wenigstens den von ihm vertretenen Standpunkt in Kürze darzulegen. Die in diesen Vorlesungen angenommene Theorie der Elektrizität ist die folgende: Es gibt nur eine Elektrizität, nicht zwei. Was die wahre Natur derselben ist, lassen wir dahingestellt, aber wir behaupten, Elektrizität ist weder Materie, noch Energie; sie hat aber mit beiden das gemeinsam, dass sie weder geschaffen, noch zerstört werden kann. Der Satz der Erhaltung der Materie, welcher im vorigen Jahrhundert von Lavoisier aufgestellt wurde, sagt aus, dass wir Materie weder schaffen, noch zerstören können, wenngleich wir ihre Verteilung, ihre Formen und Verbindungen auf unzählige Weisen ändern können. Der Satz von der Erhaltung der Energie, der während der letzten 50 Jahre von von Helmholtz, Thomson, Joule und Mayer aufgebaut ist, dass wir Energie weder schaffen noch zerstören können, wenngleich wir sie aus einer Form in die andere überführen können, wenngleich wir sie als Energie bewegter Körper (Energie der Bewegung) auftreten lassen können oder als Energie der Wärme oder als Energie der Lage eines Körpers, der entgegen der Anziehungskraft der Erde oder irgend einer anderen anziehenden Kraft in eine Lage gebracht ist, aus der er sich zurückbewegen und dabei Arbeit leisten kann. Ganz analog sagt der Satz von der Erhaltung der Elektrizität, der jetzt allmählig feste Gestalt annimmt *), hier aber zum erstenmale unter diesem Namen ausgesprochen wird, aus, dass wir Elektrizität weder schaffen, noch zerstören können, wenngleich wir ihre Verteilung ändern können — bewirken, dass an einer Stelle mehr, an einer anderen weniger auftritt — wenngleich wir sie

*) Dies ist ohne Zweifel das Endresultat der Ideen von Maxwell und Faraday über die Natur der Elektrizität. Nachdem das Vorstehende schon geschrieben war, ist eine elegante analytische Darstellung des »Satzes von der Erhaltung der Elektrizität« von G. Lippmann erschienen, der unabhängig von mir und früher zu derselben Ansicht geführt wurde.

Digitized by Google

aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung überführen können und wenngleich wir sie in Ringen und Wirbeln zirkulieren lassen können, die selbst dann andere Wirbel anziehen oder abstossen können. Bei dieser Auffassung sind alle unsere elektrischen Maschinen und Batterieen dann nichts weiter als Instrumente, welche die Verteilung der Elektrizität ändern, indem sie einen Teil derselben von einer Stelle zu einer andern schaffen oder welche die an einem Orte aufgespeicherte Elektrizität Arbeit leisten lassen, indem sie dieselbe zu ihrer ursprünglichen gleichmässigen Verteilung zurückkehren lassen. In diesen Vorlesungen nun ist überall der Versuch gemacht, die Erscheinungen aus dem Gebiete der Elektrizitätslehre dieser Auffassung entsprechend zum Ausdruck zu bringen, gleichzeitig aber ist der Verfasser in seiner Darstellung stets darauf bedacht gewesen, den Leser durch eigenes Studium sich die Auffassung bilden zu lassen, nicht aber ihm von vornherein eine bestimmte Anschauung zu oktroiieren.

Vorrede zu dem achtzehnten Tausend.

Die haupsächlichsten Erweiterungen, welche der Text dieses Buches seit dem ersten Erscheinen desselben erfahren hat, beziehen sich auf die neuern Anwendungen der Elektrizität, auf die dynamo-elektrischen Maschinen, auf die elektrischen Lampen und auf die Telephone. In der Ausdrucksweise sind einige Aenderungen vorgenommen, um etwaige Zweideutigkeiten zu vermeiden. Die Bezeichnungen der jetzt allgemein angenommenen Einheiten sind auch in diesen Vorlesungen durchweg gebraucht. Die bis dahin noch in verschiedenem Sinne gebrauchten Bezeichnungen sind jetzt alle auf die legalen Definitionen des Ohm und des Volt, wie diese Grössen von dem Pariser Kongress von 1884 festgesetzt sind, zurückgeführt. Die

Digitized by Google

Tabelle der elektrochemischen Aequivalente ist auf Grund der neuen Bestimmungen von Lord Rayleigh und von F. und W. Kohlrausch umgerechnet worden. Ueber die neueren Untersuchungen von Hughes über Magnetismus, von Schuster über elektrische Entladungen in Gasen, über die magneto-optischen Untersuchungen von Kundt und die Versuche von Wimshurst über Influenzmaschinen ist kurz berichtet worden.

Bristol, Dec. 1884.

S. P. Thompson.

VORREDE DES ÜBERSETZERS.

Wie aus dem Vorwort des Herrn Verfassers zu ersehen, sind Ende 1884 von seinem Werke in englischer Sprache allein 18,000 Exemplare in den Buchhandel gekommen[1]). Es gibt meines Wissens kein zweites Elementarbuch über Elektrizität und Magnetismus, das sich auch nur annähernd einer so allgemeinen Anerkennung zu erfreuen gehabt hat, wie dieselbe sich in dieser ausserordentlich grossen Verbreitung wohl am bered'sten ausspricht. Ich habe deshalb geglaubt, dass bei dem lebhaften Interesse, welches durch die grossartigen Fortschritte der letzten 10 Jahre auf dem Gebiete der angewandten Elektrizität (Telephonie, elektrische Beleuchtung und Kraftübertragung) in allen Kreisen für die Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus erweckt worden ist, auch eine deutsche Uebersetzung des Buches willkommen sein könnte. Vor allem aber

1) 28,000 Exemplare bis April 1887.

Digitized by Google

hat mich zu der Uebersetzung noch der Umstand bewogen, dass, während in allen wissenschaftlich gehaltenen Werken die Faraday-Maxwell'schen Vorstellungen und Theorieen eine ihrer eminenten Bedeutung entsprechende Berücksichtigung gefunden haben, meines Wissens kein Elementarbuch in deutscher Sprache [1]) existiert, in welchem der Versuch gemacht wäre, den Leser mit jenen Anschauungen bekannt zu machen. Und doch ist dies, wie das vorliegende Buch beweist, nicht nur möglich, sondern bietet in mancher Beziehung für den Anfänger wohl sogar entschiedene Vorteile. Denn als einen solchen wird man es doch z. B. ansehen müssen, dass die Kraftlinien uns gleich von vornherein stets ein anschauliches Bild von der ganzen Erscheinung verschaffen; dass wir gewissermaassen längs derselben den ganzen Vorgang entstehen sehen.

Bei der Uebertragung war es mein Bestreben, den Originaltext möglichst wortgetreu wiederzugeben, soweit dies nur irgend mit einem korrekten Deutsch vereinbar war, und habe ich mich vor allem bemüht, der knappen und doch präzisen und klaren Ausdrucksweise des Herrn Verfassers gerecht zu werden. Die wenigen Anmerkungen, welche ich für nötig gefunden habe, sind als solche des Uebersetzers gekennzeichnet. Alle Maassangaben habe ich, soweit sie nicht schon in dem auf das Meter gegründeten Systeme angegeben waren, auf dieses umgerechnet.

Loebau, Westpreussen,
im Februar 1887.

Dr. **A. Himstedt.**

---

1) Maxwell's Elementary treatise on Electricity, von dem eine deutsche Uebersetzung erschienen ist, behandelt nur die Elektrizitätslehre.

Digitized by Google

INHALTS-ÜBERSICHT.

Erster Teil.

Kapitel I: *Reibungselektrizität.*

Vorlesung:		Seite
1.	Elektrische Anziehung und Abstossung	1
2.	Elektroskope	11
3.	Elektrisierung durch Induktion	19
4.	Leitung und Verteilung der Elektrizität	29
5.	Elektrisiermaschinen	42
6.	Die Leydener Flasche und andere Kondensatoren	57
7.	Weitere Quellen der Elektrizität	66

Kapitel II: *Magnetismus.*

8.	Magnetische Anziehung und Abstossung	77
9.	Methoden zur Herstellung von Magneten	87
10.	Verteilung des Magnetismus	93
11.	Gesetze der magnetischen Kraft	102
	Anmerkung über die Methoden, um Winkel und Ecken zu berechnen. — Tabelle der natürlichen sinus und tangens.	
12.	Erdmagnetismus	119

Kapitel III: *Elektrische Ströme.*

13.	Einfache Volta'sche Elemente	130
14.	Chemische Vorgänge innerhalb des Elementes	139
15.	Volta'sche Batterieen	146
16.	Magnetische Wirkungen des Stromes	160
17.	Galvanometer	171
18.	Chemische Wirkungen des Stromes; Voltameter	182
19.	Physikalische und physiologische Wirkungen des Stromes	192

Digitized by Google

Zweiter Teil.

Kapitel IV: *Elektrostatik.*

Vorlesung : Seite
20. Potentialtheorie 203
Anmerkung über Fundamental- und abgeleitete Einheiten.
21. Elektrometer 226
22. Spezifische induktive Kapazität etc. 235
23. Erscheinungen der Entladung 251
24. Atmosphärische Elektrizität 271

Kapitel V: *Elektromagnetismus.*

25. Theorie des magnetischen Potentials 284
Anmerkung über magnetische und elektromagnetische Einheiten.
Anmerkung über die Messung der Kraft des Erdmagnetismus in absoluten Einheiten.
Anmerkung über Index-Bezeichnung.
26. Elektromagnete 303
27. Elektrodynamik 310
28. Diamagnetismus 320

Kapitel VI: *Messung der Ströme etc.*

29. Das Ohm'sche Gesetz und seine Folgerungen 327
30. Elektrische Messungen 336
Anmerkung über das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten.

Kapitel VII: *Wärme, Licht und Arbeit der elektrischen Ströme.*

31. Wärmewirkungen der Ströme 350
32. Das elektrische Licht 356
33. Elektromotoren (Elektromagnetische Maschinen) 363

Kapitel VIII: *Thermo-Elektrizität.*

34. Thermo-elektrische Ströme 370

Digitized by Google

Kapitel IX: *Elektro-Optik.*

Vorlesung: Seite
35. Allgemeine Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität . . . 377

Kapitel X: *Induktionsströme (Magnet-Elektrizität.)*

36. Von den durch Induktion erzeugten Strömen 386
37. Magnet-elektrische und dynamo-elektrische Generatoren 402

Kapitel XI: *Elektro-Chemie.*

38. Elektrolyse und Elektrometallurgie 414

Kapitel XII: *Telegraphen und Telephone.*

39. Elektrische Telegraphen 429
40. Elektrische Glocken, Uhren und Telephone 439

Anhang.

Uebungsaufgaben 450
Namen- und Sach-Register 470
Zusätze 480

Digitized by Google

Digitized by Google

ERSTER TEIL.

KAPITEL I.

REIBUNGSELEKTRIZITÄT.

I. VORLESUNG: *Elektrische Anziehung und Abstossung.*

1. Elektrische Anziehung. Wenn man ein Stück Siegellack, Harz oder einen Glasstab mit einem wollenen oder seidenen Lappen reibt, so findet man, dass dieselben eine Eigenschaft bekommen haben, welche sie früher nicht hatten:

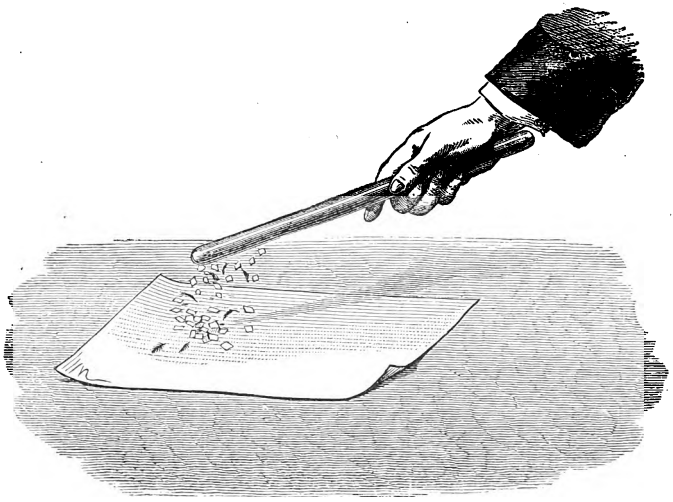

Fig. 1.

nämlich die Fähigkeit, leichte Körper, wie Häcksel, Staubteilchen oder Papierschnitzel anzuziehen (Fig. 1). Diese merk-

Digitized by Google

würdige Eigenschaft wurde zuerst an dem Bernstein (griechisch ἤλεκτρον) beobachtet, und wird erwähnt von Thales von Milet (600 v. Chr.), sowie von Theophrast in seiner Abhandlung über Edelsteine, welche nach der Reibung leichte Körper anziehen. Obgleich sehr viele Körper diese Eigenschaft besitzen, waren doch Bernstein und Gagat die beiden einzigen, an denen die Alten dieselbe erkannt hatten, und bis zu dem Zeitalter der Königin Elisabeth von England ist kein Fortschritt auf diesem Gebiete zu verzeichnen. Erst um das Jahr 1600 fand Dr. Gilbert in Colchester bei seinen Versuchen, dass nicht allein Bernstein und Gagat jene Eigenschaft besitzen, sondern noch eine grosse Zahl anderer Körper, wie z. B. Diamant, Saphir, Bergkrystall, Glas, Schwefel, Siegellack, Harz etc., welche er deshalb *elektrische Körper* nannte [1]). Seit jener Zeit gebraucht man allgemein für jenes Agens, welches die erwähnten Erscheinungen hervorruft, das Wort **Elektrizität.** Gilbert bemerkte ferner noch, dass die Versuche bei vorhandener Feuchtigkeit misslingen.

2. Eine bessere Methode jene anziehende Kraft zu beobachten, besteht darin, dass man eine kleine Hollundermark- oder Korkkugel mittelst eines dünnen Fadens an einem Stativ befestigt, wie es Fig. 2 zeigt. Wenn man alsdann eine trockene, warme Glasröhre durch starkes Reiben mit einem seidenen Tuche erregt, so wird dieselbe die Hollundermarkkugel kräftig anziehen, ein Beweis, dass sie in hohem Grade elektrisiert ist. Als geeignetstes Reibzeug für ein Stück Siegellack erweist sich Flannell, Wolle oder, am besten von allen, Pelzwerk. Boyle fand, dass ein elektri-

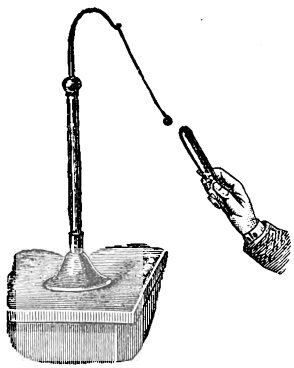

Fig. 2.

1) »Electrica; quae attrahunt eadem ratione ut electrum.« — Gilbert.

Digitized by Google

sierter Körper selbst wieder von einem zweiten nicht elektrisierten angezogen wird. Dies lässt sich in folgender Weise darthun (siehe Fig. 3): man hängt eine geriebene Siegellackstange oder einen geriebenen Glasstab in einer Drahtschlinge an dem einen Ende eines *seidenen* Fadens auf; streckt man dann nach dem aufgehängten elektrisierten Körper die Hand aus, so wird derselbe sich drehen und der Hand sich nähern. Ebenso wird man finden, wenn ein seidenes Band mit erwärmtem Kautschuk gerieben oder auch nur zwischen zwei erwärmten Flanelllappen hindurchgezogen wird, und man es dann an dem einen Ende fasst, dass sein anderes Ende von in die Nähe gebrachten Gegenständen angezogen wird. Bringt man das Band in die Nähe der Zimmerwand, so wird es gegen dieselbe fliegen und dort haften bleiben. Bei geeigneten Vorsichtsmassregeln lässt sich zeigen, dass sowohl das Reibzeug als auch der geriebene Gegenstand sich im elektrischen Zustande befinden, denn beide werden leichte Körper anziehen; um dies nachzuweisen, muss man sich aber in acht nehmen das Reibzeug nicht zu viel zu berühren. Will man zeigen, dass in dem Falle, wenn eine Siegellackstange mit einem Stück Kaninchenfell gerieben wird, letzteres ebenfalls elektrisch wird, so thut man gut, das Fell nicht mit der Hand anzufassen, sondern es an das eine Ende eines gläsernen Handgriffes zu binden. Der Grund dieser Vorsichtsmassregel soll am Ende dieser und ausführlicher in der vierten Vorlesung angegeben werden.

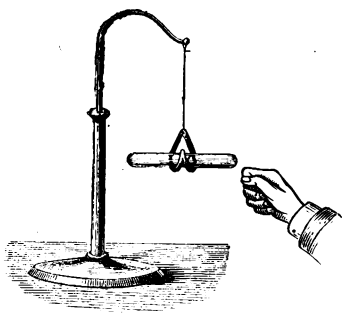

Fig. 3.

Viele Körper, so insbesondere Eisen, Gold, Messing und alle Metalle zeigen, wenn man sie mit der Hand anfasst und dann reibt, keine Spur von Elektrizität, d. h. sie ziehen leichte Körper nicht an, wie dies geriebener Bernstein oder geriebenes Glas thun. Gilbert führt auch noch Perlen, Marmor, Achat

Digitized by Google

und Magnetstein unter denjenigen Körpern auf, welche durch Reiben nicht elektrisch erregt werden. Solche Körper nannte man deshalb früher *anelektrisch.* Diese Bezeichnung ist aber falsch, denn wenn man solche an gläsernen Handgriffen befestigt und dann mit Seide oder Pelz reibt, so verhalten sie sich wie die elektrischen Körper.

3. Elektrische Abstossung. Experimentiert man, wie in Fig. 1, mit einem geriebenen Glasstabe und Papier- oder Strohschnitzeln oder Kleie, so wird man finden, dass letztere zuerst angezogen und gegen den elektrisierten Stab fliegen, dann aber nach der Berührung mit diesem sogleich wieder abgestossen und auf den Tisch zurückfallen werden. Um diese Abstossung besser zu zeigen, hänge man eine kleine Feder oder Dune mittelst eines seidenen Fadens an einem Stativ (Fig. 4) auf und bringe einen elektrisierten Glasstab in die Nähe. Die Feder wird dann gegen den Stab fliegen und daran haften bleiben, um im nächsten Augenblicke durch eine unsichtbare Kraft wieder abgestossen zu werden, sie wird nun nicht wieder vom Glasstabe angezogen. Wenn man aber jetzt die Hand der Feder nähert, so wird sie gegen diese fliegen, wie der geriebene Körper in Fig. 3; ein Beweis, dass die Feder, obgleich sie nicht selbst gerieben wurde, doch dieselbe Eigenschaft besitzt, welche ursprünglich dem Stabe durch Reiben mitgeteilt wurde.

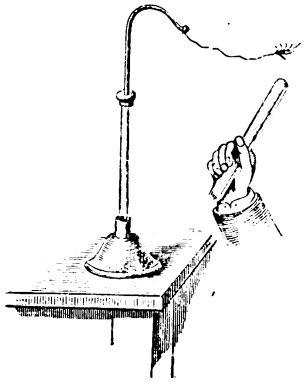

Fig. 4.

In der That ist die Feder elektrisch geworden durch die Berührung mit einem elektrisierten Körper, welcher einen Teil seiner Elektrizität an sie abgegeben hat. Aus diesem Versuche kann man aber noch einen weiteren Schluss ziehen, nämlich den, dass zwei mit derselben Elektrizität geladene Körper sich gegenseitig abstossen. Die Richtigkeit dieses Satzes lässt sich in folgender Weise zeigen. Hängt

Digitized by Google

man einen geriebenen Glasstab wie in Fig. 3 auf, so wird derselbe von einem zweiten geriebenen Glasstabe abgestossen, ebenso wird eine geriebene Siegellackstange von einer zweiten geriebenen Siegellackstange abgestossen. Eine andere Methode, um die gegenseitige Abstossung zweier in gleicher Weise elektrisierten Körper zu zeigen, besteht darin, dass man zwei kleine Hollundermarkkugeln mittelst dünner Seidenfäden an ein gläsernes Stativ hängt, wie in Fig. 5, und beide mit demselben geriebenen Glasstabe berührt. Sie stossen sich dann gegenseitig ab und fliegen auseinander, anstatt, wie vorher, schlaff neben einander zu hängen. Je mehr man ihnen dann den Glasstab nähert, desto weiter entfernen sie sich von einander, denn jetzt übt derselbe auf beide eine abstossende Kraft aus. Die Abstossung, welche zwischen den einzelnen Teilen eines elektrisierten Körpers selbst statt findet, lässt sich sehr schön durch den Versuch mit einer elektrisierten Seifenblase zeigen: dieselbe dehnt sich nach dem Elektrisieren aus.

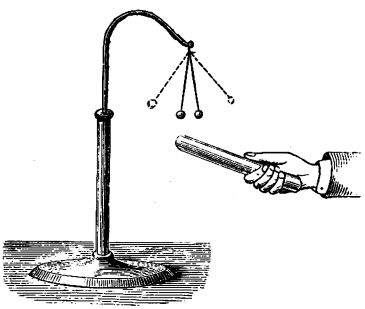

Fig. 5.

4. Zwei verschiedene Arten der Elektrizität. Elektrisierte Körper stossen sich jedoch nicht immer ab. Die Feder, welche (Fig. 4) mit einem geriebenen Glasstabe in Berührung gebracht und in Folge hiervon von demselben abgestossen wurde, wird angezogen, wenn man ihr eine geriebene Siegellackstange nähert; und umgekehrt, wenn die Feder zuerst durch Berührung mit der geriebenen Siegellackstange elektrisiert wurde, so wird sie von einem geriebenen Glasstabe angezogen und von dem geriebenen Siegellack abgestossen. In gleicher Weise wird ein geriebener Glasstab, den man wie in Fig. 3 aufgehängt hat, angezogen von einer geriebenen Siegellackstange oder einem Stück Harz oder Bernstein, abgestossen dagegen von einem ge-

Digitized by Google

riebenen Glasstabe. Wenn man die beiden Hollundermarkkugeln, wie in Fig. 5, mit einem geriebenen Glasstabe berührt, so entfernen sie sich von einander in Folge der Abstossung, und, wie wir gesehen haben, um so mehr, je näher man ihnen den elektrisierten Glasstab bringt; dagegen nähern sie sich wieder gegenseitig, sobald man eine geriebene Siegellackstange unter sie hält, da sie von derselben angezogen werden. Diese und ähnliche Vorgänge wurden zuerst von Symmer beobachtet, und unabhängig von ihm, durch Du Fay entdeckt, welcher zu ihrer Erklärung zwei verschiedene Arten von Elektrizität annahm, wovon sich die eine gegenseitig anziehen, während die andere sich selbst abstossen sollte. Er nannte diejenige Elektrizität, welche auf dem Glase durch Reiben mit Seide erregt wurde, Glaselektrizität, da er, allerdings fälschlich, annahm, dass Glas keine andere Art liefern könne, und diejenige Elektrizität, welche er in Körpern, wie Siegellack, Harz, Schellack, Kautschuk und Bernstein durch Reiben mit Wolle oder Flanell erregte, bezeichnete er als Harzelektrizität. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Art der erregten Elektrizität nicht allein von dem geriebenen Gegenstande, sondern auch von dem Reibzeuge abhängt. Denn Glas liefert Harzelektrizität, wenn man es mit einem Katzenfell reibt; und Harz liefert Glaselektrizität beim Reiben mit einem Lederkissen, das mit einem weichen Amalgam aus Zinn und Quecksilber überzogen ist. Deshalb hat man diese Namen fallen lassen zu Gunsten der passenderen Bezeichnungen Franklin's, welcher die im Glase durch Reiben mit Seide erregte Elektrizität, die *positive* Elektrizität und die in harzhaltigen Körpern durch Reiben mit Wolle oder Pelz erregte, die *negative* Elektrizität nannte. Die Beobachtungen Symmer's und Du Fay's lassen sich daher folgendermassen aussprechen: Zwei positiv elektrisierte Körper stossen einander ab; zwei negativ elektrisierte Körper stossen einander ab; aber ein positiv elektrisierter Körper und ein negativ elektrisierter ziehen einander an.

5. Gleichzeitige Erregung beider elektrischen Zustände. Keine Art der Elektrizität wird allein erregt; immer

Digitized by Google

wird eine gleiche Quantität beider Arten erregt, und zwar tritt die eine Art an dem geriebenen Gegenstande auf, die andere in genau gleicher Menge an dem Reibzeuge. Dass diese Quantitäten gleich sind, kann in einigen Fällen klar bewiesen werden. Denn wenn man beide, sowohl die — (negative) Elektrizität des Reibzeuges wie die + (positive) Elektrizität des geriebenen Körpers einem dritten Körper mitteilt, so wird dieser *keine Elektrizität zeigen;* die beiden gleichen und entgegengesetzten Elektrizitäten werden einander genau neutralisieren.

Nachstehend aufgeführte Körper sind so geordnet, dass, wenn zwei von ihnen zusammen gerieben werden, der vorangehende + und der nachfolgende — elektrisch wird: *Pelz, Wolle, Elfenbein, Glas, Seide, Metalle, Schwefel, Kautschuk, Guttapercha, Kollodium.*

6. Theorieen der Elektrizität. Man hat verschiedene Theorieen in Vorschlag gebracht, um die vorstehend beschriebenen Erscheinungen zu erklären, aber alle sind mehr oder weniger unzureichend. Symmer schlug eine **„Zwei-Fluida"-Theorie** vor, nach welcher man zwei unwägbare elektrische Fluida von entgegengesetzter Art unterscheidet, welche sich bei ihrer Vereinigung gegenseitig neutralisieren, und welche in allen Körpern in gleichen Mengen vereint auftreten, so lange, bis ihr Zustand durch Reiben geändert wird. Eine Modifikation dieser Theorie wurde von Franklin gegeben, welcher eine **„Ein-Fluidum"-Theorie** vorschlug. Nach dieser ist ein einziges elektrisches Fluidum im gewöhnlichen Zustande der Körper gleichmässig in ihnen verteilt und dieses verteilt sich, wenn sie gerieben werden, in ungleicher Weise zwischen dem Reibzeuge und dem geriebenen Körper, so dass dann der eine mehr, der andere weniger von dem Fluidum enthält, als den Durchschnittsbetrag. Aus dieser Vorstellung stammen die Ausdrücke + (Plus) und — (Minus), welche man bis heutzutage beibehalten hat; der Körper, von welchem man annnimmt, er habe einen Ueberschuss, ist mit + Elektrizität geladen, während der Körper, von welchem man annimmt, er habe weniger, mit — Elektrizität geladen ist. Diese

Digitized by Google

Bezeichnungen sind jedoch ganz willkürlich, denn bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft wissen wir nicht, in welchem von diesen beiden Zuständen ein Körper mehr Elektrizität, in welchem er weniger besitzt. Soviel steht jedoch ganz fest, dass *die Elektrizität kein materielles Fluidum ist*, was sie nun sonst auch sein möge. Einem Fluidum gleicht sie nur in so fern, als sie dem Anschein nach von einer Stelle zu einer andern fliesst, unterscheidet sich aber von jedem bekannten Fluidum in fast allen andern Beziehungen. Z. B. hat sie kein Gewicht und stösst sich selbst ab. Ueberdies ist es ganz unmöglich, zwei Fluida zu denken, deren Eigenschaften in jeder Beziehung das gerade Gegenteil von einander sein sollten. Deshalb führt es zu offenbaren Irrtümern, wenn man von einem elektrischen Fluidum oder von 2 Fluida spricht, so bequem die Bezeichnung auch zu sein scheint. Eine andere Theorie, welche allgemein unter dem Namen **Molekulartheorie** der Elektrizität bekannt ist, und welche zuerst von Faraday ausführlich auseinandergesetzt wurde, nimmt an, dass die elektrischen Zustände das Resultat gewisser besonderer Zustände der Moleküle der geriebenen Körper oder auch des Aethers sind, welcher, wie man annimmt, die Moleküle umgibt. Es lässt sich viel zu Gunsten dieser Hypothese sagen, doch ist sie noch nicht bewiesen worden. Wir werden daher in diesen Vorlesungen alle Theorieen, so weit als thunlich, vermeiden und uns damit begnügen nur das Wort **Elektrizität** zu gebrauchen.

7. **Ladung.** Die Elektrizitätsmenge, sei sie von der einen oder andern Art, welche durch Reiben oder andere Mittel an der Oberfläche eines Körpers erregt ist, wird als **Ladung** und ein elektrisierter Körper als *geladen* bezeichnet Natürlich hat man sowohl Ladungen von verschiedener Grösse oder Stärke, wie Ladungen von verschiedener Art zu unterscheiden. Wenn die elektrische Ladung einem geladenen Körper entzogen wird, so sagt man derselbe sei *entladen*. Gute Leiter der Elektrizität werden augenblicklich entladen, wenn man sie mit der Hand oder irgend einem andern mit dem Erdboden in Verbindung

Digitized by Google

stehenden Leiter berührt, indem die Ladung in diesem Falle in die Erde entweichen kann. Einen Körper, welcher kein guter Leiter ist, kann man schnell entladen, wenn man ihn durch die Flamme einer Spirituslampe oder Kerze zieht, da die Flamme sofort die Elektrizität wegführt und sie in die Luft zerstreut.

Die Elektrizität kann entweder auf der Oberfläche der Körper als *Ladung* haften, oder durch ihr Inneres als *Strom* fliessen. Der Teil der Wissenschaft, welcher von den Gesetzen der Ladungen an der Oberfläche der Körper handelt, heisst **Elektrostatik** und wird im 4ten Kapitel behandelt. Derjenige Teil, welcher von den Strömen der Elektrizität handelt, findet sich im dritten Kapitel und noch an andern Stellen dieses Buches.

8. Konduktoren und Isolatoren. Den oben gebrauchten Ausdruck Leiter (Konduktor) wendet man auf diejenigen Körper an, welche die Elektrizität schnell durch sich durchfliessen lassen. Man kann die Körper in 2 Klassen einteilen: In solche, welche die Elektrizität leiten, und in solche, welche sie nicht leiten. Allerdings gibt es viele Körper, von denen man streng genommen weder sagen kann, sie leiten die Elektrizität, noch auch, sie leiten sie nicht, und die deshalb nicht gut in eine jener beiden Abteilungen gebracht werden können. Alle Metalle leiten gut, der menschliche Körper leitet, und ebenso Wasser. Andererseits gehören Glas, Siegellack, Seide, Schellack, Guttapercha, Kautschuk, Harz, im allgemeinen alle fettigen Substanzen und die Luft zu den **Nichtleitern**. Daher gebraucht man einen Teil dieser Körper dazu, um aus ihnen Stative und Handgriffe für elektrische Apparate zu verfertigen, wenn es darauf ankommt, die Elektrizität nicht entweichen zu lassen. Aus diesem Grunde nennt man sie auch **Isolatoren**. Faraday nannte sie **dielektrische** Körper (Dielectrica). Wir haben oben bemerkt, dass Gilbert diejenigen Körper *nicht-elektrisch* nannte, welche, wie die Metalle, keine Spur von Elektrizität zeigen, wenn man sie in der Hand hält und reibt. Wir kennen jetzt den Grund, weshalb sie keine Elektrizität zeigen; denn

Digitized by Google

da sie gute Leiter sind, so fliesst die Elektrizität ebenso schnell weg, wie sie erzeugt wird. Die Beobachtung Gilbert's, dass elektrische Versuche bei feuchtem Wetter misslingen, lässt sich ebenfalls erklären, wenn man weiss, dass das Wasser zu den Leitern gehört; die Feuchtigkeitsschicht nämlich, welche die Oberfläche der Körper bei feuchtem Wetter überzieht, lässt die durch Reibung erregte Elektrizität ebenso schnell wieder entweichen wie sie erzeugt wurde.

9. Weitere elektrische Erscheinungen. Die Erregung der Elektrizität durch Reibung wird ausser durch die Anziehung und Abstossung, welche wir bisher als Beweis für das Vorhandensein der Elektrizität hingestellt haben, noch durch andere Erscheinungen erwiesen. Otto von Guericke bemerkte zuerst, dass man von stark elektrisierten Körpern im Augenblicke ihrer Entladung Lichtfunken und Lichtblitze erhalten kann. Solche Funken werden, wie Newton und andere Forscher schon bemerkten, gewöhnlich von einem Knistern begleitet, welches im Kleinen an den den Blitz begleitenden Donner erinnert. Matte Lichtblitze erhält man auch bei der Entladung der Elektrizität durch zum Teil luftleer gepumpte Röhren. Andere Wirkungen sollen in geeigneter Folge erwähnt werden.

10. Weitere Quellen der Elektrizität. *Reibung* ist keineswegs die einzige Quelle der Elektrizität. Die übrigen Quellen, Stoss, Kompression, Wärme, chemische und physiologische Prozesse, metallische Berührung etc. sollen in der 7. Vorlesung behandelt werden. Hier wollen wir nur bemerken, dass Reibung zweier verschiedener Körper, gleichviel welcher, stets eine elektrische Scheidung bewirkt. Symmer beobachtete Elektrizitätserregung, als ein seidener Strumpf über einen wollenen gezogen wurde, obschon Wolle an Wolle gerieben, oder Seide an Seide keine elektrische Wirkung hervorbringt. Wenn man aber rauhes Glas an glattem Glase reibt, so bemerkt man Elektrizitätserregung, und in der That spielt auch die Beschaffenheit der Oberfläche eine sehr wichtige Rolle bei der Erregung von Reibungselektrizität. Im allgemeinen wird von zwei an einander

Digitized by Google

geriebenen Körpern derjenige negativelektrisch, dessen Teilchen bei der Reibung am leichtesten verschoben werden können. Temperaturunterschiede üben ebenfalls einen Einfluss auf die elektrische Beschaffenheit eines Körpers aus; ein warmer Körper wird gewöhnlich negativ elektrisch, wenn man ihn an einem kalten Stücke derselben Substanz reibt. Péclet fand, dass die Stärke der Elektrizitätserregung, welche durch das Reiben zweier Körper an einander hervorgebracht wird, unabhäng ist von dem Drucke und der Grösse der zur Berührung gelangenden Oberflächen, dagegen abhängig von der Substanz der Körper und der Geschwindigkeit, mit welcher sie über einander bewegt werden. Rollende Reibung erzeugte dieselben Wirkungen wie gleitende. Die Menge der erregten Elektrizität ist dem Aufwande an wirklicher mechanischer Reibung nicht proportional, und deshalb scheint es zweifelhaft zu sein, ob die Reibung die wahre Ursache der Elektrizitätserregung ist. Es ist vielmehr wahrscheinlich, dass die wahre Ursache in der *Berührung* verschiedener Substanzen zu suchen ist (siehe Art. 73) und dass man, wenn zwei Teilchen bei der Berührung entgegengesetzt elektrisch geworden sind, das eine +, das andere —, dieselben erst trennen muss, bevor man ihre respektiven Elektrizitäten beobachten kann. Elektrisiermaschinen sind deshalb so eingerichtet, dass sie ungleiche Substanzen in unmittelbare Berührung bringen und darauf die Teilchen, welche sich berührt haben und elektrisch geworden sind, wieder von einander trennen.

II. VORLESUNG: *Elektroskope.*

11. Einfache Elektroskope. Ein Instrument, welches erkennen lässt, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, und ob die Elektrizität + oder — ist, heisst ein **Elektroskop.** Die Feder, welche angezogen oder abgestossen wurde, und die beiden Hollundermarkkugeln, welche auseinander gingen, wie wir in der ersten Vorlesung fanden, sind in der That einfache Elektroskope. Es gibt jedoch noch zahlreiche Apparate, die für diesen

Digitized by Google

besondern Zweck geeigneter sind; und einige von ihnen sollen hier beschrieben werden.

12. Das Strohhalmelektroskop. Das erste Elektroskop wurde von Dr. Gilbert angegeben. Dasselbe besteht (Fig. 6)

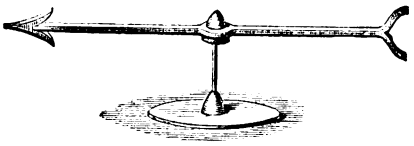

Fig. 6.

aus einem steifen Strohhalm, welcher leicht auf einer scharfen Spitze schwebt. Ein dünner Messing- oder Holzstreifen, oder auch ein Gänsefederkiel, auf einer Nähnadel schwebend, thun dieselben Dienste. Bringt man einen elektrisierten Körper in die Nähe des Elektroskopes, so dreht sich dasselbe und wird angezogen, und zeigt auf diese Weise noch Mengen von Elektrizität an, die viel zu klein sind um Papierschnitzeln vom Tische anzuziehen.

12. Das Goldblattelektroskop. Ein noch empfindlicherer Apparat ist das **Goldblattelektroskop** (Fig. 7), welches von Bennet erfunden wurde. Wir haben gesehen, dass 2 Hollundermarkkugeln, welche mit derselben Elektrizität geladen sind, sich abstossen und von einander entfernen, wobei also die Schwerkraft zum Teil von der elektrischen Abstossung überwunden wird. Ebenso verhalten sich zwei schmale Streifen sehr dünnen Papiers, welche man an einer Stütze befestigt, wenn man dieselben elektrisiert. Die besten Wirkungen erzielt man jedoch mit 2 Streifen Goldblatt, da dieses ausserordentlich dünn und deshalb noch viel leichter als das dünnste Papier ist. Behufs Anfertigung eines Goldblattelektroskops hängt man zweckmässig die beiden Blätter innerhalb einer weithalsigen Glasflasche auf. Diese hat einen doppelten Zweck, einmal die Blättchen vor Luftzug zu schützen und zweitens sie vor der Berührung mit dem Erdboden zu bewahren. Durch den Kork, welchen man mit Schellack oder Paraffinwachs firnisst, führt man eine kleine

Digitized by Google

ebenfalls gefirnisste Glasröhre, durch diese geht ein steifer Messingdraht, dessen unteres Ende man rechtwinklig so umbiegt, dass die beiden Goldblattstreifen dadurch gehalten werden.

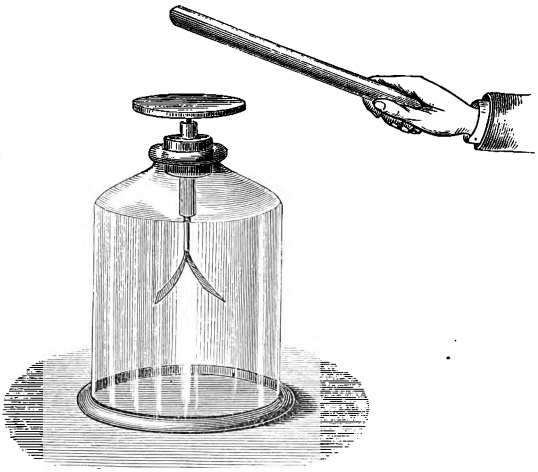

Fig. 7.

Das obere Ende des Drahtes trägt eine kleine Metallplatte oder ist mit einem Messingknopfe versehen. Hält man das Elektroskop trocken und staubfrei, so zeigt es ausserordentlich kleine Mengen von Elektrizität an. Ein geriebener Glasstab wird noch in einer Entfernung von 2—3 Fuss von dem Apparate die gegenseitige Abstossung der Blätter bewirken. Wenn man einen Bleistift spitzt, und die Späne oben auf das Elektroskop fallen lässt, so bemerkt man, dass dieselben elektrisch sind. Ja wenn der Knopf nur mit einer Kameelhaarbürste gebürstet wird, so bringt die geringe Reibung eine merkliche Wirkung hervor. Mit Hülfe dieses Apparates lässt sich zeigen, dass jede Art der Reibung Elektrizität erzeugt. Wenn Jemand auf einer isolierenden Unterlage steht, z. B. auf einem Schemel mit gläsernen Beinen oder auf einem über 4 Gläser gelegten Brette, und dann schnell mit einem seidenen Taschentusche oder mit einem Fuchsschwanze geschlagen wird oder auch nur mit einer Tuch-

Digitized by Google

bürste gebürstet wird, so wird er elektrisiert, was durch das Elektroskop angezeigt wird, sobald er die Hand auf den Knopf desselben legt. Das Goldblattelektroskop kann ferner dazu dienen, um die *Art* der Elektrizität eines elektrisierten Körpers anzuzeigen. Reibt man z. B. ein Stück Löschpapier mit Kautschuk, so kann man auf folgende Weise entscheiden, ob die Elektrizität des Papiers + oder — ist. Zunächst lade man die Goldblätter des Elektroskopes, indem man den Knopf mit einem an Seide geriebenen Glasstabe berührt. Die Blätter gehen auseinander, da sie jetzt beide mit + Elektrizität geladen sind. In diesem Zustande wird die Annäherung eines mit + Elektrizität geladenen Körpers die Blätter noch weiter auseinander streben lassen, während sie bei der Annäherung eines mit — Elektrizität geladenen Körpers zusammenfallen würden. Bringt man jetzt das Löschpapier in die Nähe des Elektroskopes, so findet man, dass die Blätter noch mehr divergieren, ein Beweis also, dass die Elektrizität des Papiers die nämliche ist wie diejenige, womit das Elektroskop geladen ist, also +.

Das Goldblattelektroskop zeigt auch den ungefähren Betrag der Elektrizität eines dasselbe berührenden Körpers an, denn die Goldblätter gehen um so mehr auseinander, je grösser die ihnen mitgeteilte Menge der Elektrizität ist. Will man jedoch eine vorhandene Elektrizitätsmenge genau messen, so muss man die unter dem Namen Elektrometer bekannten Instrumente zu Hilfe nehmen, welche in der 21. Vorlesung beschrieben werden sollen.

Bei einer andern Form des Elektroskopes (dem Bohnenberger'schen) hat man nur ein Goldblatt, welches zwischen 2 Metallplatten aufgehängt ist, von denen die eine +, die andre — elektrisch gemacht werden kann, indem man sie mit den Polen einer trockenen Säule (Art. 182) verbindet. Je nachdem das Goldblatt + oder — geladen wird, wird es von der einen oder andern Seite angezogen und von der gegenüberliegenden abgestossen, entsprechend dem in Art. 4 angegebenen Gesetze der Anziehung und Abstossung.

Digitized by Google

14. Henley's Quadrant-Elektroskop. Das Quadrant-Elektroskop wendet man bisweilen an, um grosse elektrische Ladungen anzuzeigen. Es besteht aus einer Hollundermarkkugel, welche am Ende eines leichten Hebelarms steckt, der durch eine Achse an einem geraden Ständer befestigt ist. Wird der ganze Apparat elektrisiert, so wird die Hollundermarkkugel von dem Ständer abgestossen und entfernt sich von demselben um einen Winkel, welcher auf einer dahinter befindlichen geteilten Skala oder einem Quadranten angezeigt wird. Fig. 8 zeigt die gewöhnliche Form des Apparates. Dieses kleine **Elektroskop**, welches meist nur gebraucht wird, um das Geladensein einer elektrischen Maschine oder einer Leydener Batterie zu zeigen, darf nicht mit dem in der 21. Vorlesung beschriebenen, empfindlichen Quadrant-Elektrometer verwechselt werden, dessen Aufgabe es ist, sehr kleine elektrische Ladungen zu *messen*, nicht aber grosse Ladungen *anzuzeigen*.

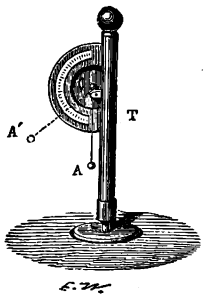

Fig. 8.

15. Die Torsionswaage. Es erscheint zweckmässig, schon an dieser Stelle den unter dem Namen Torsionswaage bekannten Apparat zu beschreiben, obgleich derselbe eigentlich mehr ein *Elektrometer*, als ein blosses *Elektroskop* ist (Fig. 9). Derselbe dient dazu, die abstossende Kraft zwischen 2 mit derselben Elektrizität geladenen Körpern zu messen. Man hält dabei dieser abstossenden Kraft das Gleichgewicht durch eine zweite Kraft, die von einem feinen Drahte ausgeübt wird, der, wenn er gedrillt (tordiert) worden ist, in die Gleichgewichtslage zurückzukehren (sich zu detordieren) strebt. Die Torsionswaage besteht aus einem leichten

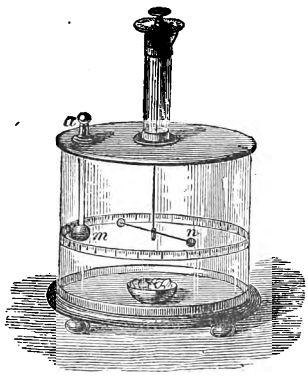
Fig. 9.

Digitized by Google

Hebelarme von Schellack, welcher innerhalb eines cylindrischen Glasgefässes an einem feinen Silberdrahte aufgehängt ist. An dem einen Ende dieses Hebels befindet sich eine vergoldete Hollundermarkkugel *n*. Das obere Ende des Silberdrahtes ist an einer Messingscheibe befestigt, auf welcher sich ein in Grade geteilter Kreis befindet. Diese Scheibe ist drehbar über der sie tragenden Röhre, und heisst die Torsionsscheibe. Durch eine Oeffnung im Deckel des Gefässes kann man in dasselbe eine zweite vergoldete Hollundermarkkugel *m* bringen, welche am Ende eines vertikalen Glasstabes *a* befestigt ist. Rings um das Glasgefäss ist in der Höhe der Hollundermarkkugeln ein Kreis gezogen, welcher ebenfalls in Grade geteilt ist. Will man nun die Torsionswaage dazu benutzen, die Grösse einer elektrischen Ladung zu messen, so kann man auf folgende Weise verfahren: Zuerst wird die Torsionsscheibe soweit gedreht, bis die beiden Hollundermarkkugeln *m* und *n* einander gerade berühren. Dann nimmt man den Glasstab *a* heraus und teilt die zu messende elektrische Ladung der Kugel *m* mit, welche darauf wieder in die Waage gebracht wird. Sobald *m* und *n* sich berühren, geht ein Teil von *m* auf *n* über, und die Kugeln stossen sich gegenseitig ab, da sie nun mit derselben Elektrizität geladen sind. Deshalb wird die Kugel *n* im Kreise fortgetrieben und der Draht bis zu einem gewissen Betrage gedreht. Die abstossende Kraft wird aber um so geringer, je mehr sich *n* von *m* entfernt, während die Kraft des Drahtes wächst, je mehr derselbe gedreht wird. Daher werden sich diese beiden Kräfte einander das Gleichgewicht halten, wenn die Kugeln einen gewissen Abstand erreicht haben, und es ist klar, dass eine grosse elektrische Ladung die Kugel *n* mit einer stärkern Kraft abstösst, als eine kleine elektrische Ladung. Den Abstand, bis zu welchem die Kugel gestossen wird, liest man nicht in Zentimetern, sondern in Graden an der Skala ab. Wenn ein Draht gedreht wird, so ist die Kraft, mit welcher er in die Gleichgewichtslage zurückzukehren strebt, genau dem Betrage der Drehung proportional. Die Kraft, welche erforderlich ist,

Digitized by Google

den Draht um 10 Grade zu drehen, ist gerade 10mal so gross wie die Kraft, welche erforderlich ist, den Draht um einen Grad zu drehen. Mit andern Worten: *Die Torsionskraft ist dem Torsionswinkel proportional.* Andererseits ist der durch Grade ausgedrückte Abstand der beiden Kugeln, falls sie nicht sehr weit von einander entfernt sind, ihrem geradlinigen Abstande nahezu proportional und drückt die Kraft aus, welche 2 elektrisierte Kugeln *in jener Entfernung* auf einander ausüben. Der Leser muss jedoch sorgfältig unterscheiden zwischen dem Messen der **Kraft** und dem Messen der wirklichen **Menge** der Elektrizität, mit welcher der Apparat geladen ist. Denn die Kraft, welche die elektrisierten Kugeln auf einander ausüben, ist bei verschiedenen Abständen verschieden, zufolge eines besondern Gesetzes, welches das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis heisst und welches eine genaue Erklärung erheischt.

16. Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis. Coulomb bewies mit Hilfe der Torsionswaage, dass die Kraft, welche 2 kleine elektrisierte Körper auf einander ausüben, dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Wenn demnach 2 elektrisierte Körper in einer Entfernung von 1 Zentimeter sich mit einer bestimmten Kraft abstossen, so findet man, dass die Kraft in einer Entfernung von 2 Zentimetern nur den vierten Teil so gross ist, wie die Kraft für 1 Zentimeter Entfernung; und bei 10 Zentimetern wird sie nur den 100. Teil so gross sein, wie bei 1 Zentimeter. Dies Gesetz wird durch folgenden Versuch mit der Torsionswaage bewiesen. Die beiden Skalen (an der oberen Messingscheibe und am Glasgefässe) wurden auf 0° eingestellt und den Kugeln eine bestimmte Ladung mitgeteilt. Die Kugel *n* wurde hierdurch bis zu einem Abstande von 36° abgestossen. Die Drehung des Drahtes zwischen seinen beiden Enden betrug ebenfalls 36° oder anders ausgedrückt, die abstossende Kraft zwischen den elektrisierten Kugeln war 36 mal so gross, wie die Kraft, welche erforderlich gewesen wäre, den Draht um 1° zu drehen. Die Torsionsscheibe wurde hierauf so gedreht, dass die Torsion

Digitized by Google

des Drahtes noch vergrössert wurde, dagegen die Kugel *n* sich der Kugel *m* näherte, und zwar wurde die Torsionsscheibe so lange gedreht, bis der Abstand zwischen *n* und *m* nur noch halb so gross war. Um den Abstand von 36° bis auf 18° zu vermindern, musste man die Torsionsscheibe um 126° drehen. Die totale Drehung zwischen den beiden Enden des Drahtes betrug also jetzt $126° + 18° = 144°$; und die Kraft war mithin 144mal so gross, wie die Kraft, welche den Draht um 1° gedreht haben würde. 144 ist aber 4mal so gross, wie 36; daraus erkennt man, dass, während der Abstand auf die *Hälfte* reduziert worden war, die zwischen den Kugeln wirkende Kraft *4mal* so gross geworden war. Hätte man den Abstand auf *den vierten Teil*, also auf 9° reduziert, so hätte man als totale Drehung des Drahtes 576° gefunden; also *16mal* so gross; ein Beweis, dass die Kraft **dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional** ist.

Bei einem Versuche bedarf es einer grossen Erfahrung und Geschicklichkeit, um so genaue Resultate wie die vorstehenden zu erzielen, denn der Apparat gibt zu manchen Fehlern Veranlassung. Die Kugeln müssen im Vergleich zu ihrem gegenseitigen Abstande sehr klein sein. Ausserdem werden die elektrischen Ladungen nach und nach schwächer, als ob die Elektrizität in die Luft entwiche. Dieser Verlust wird geringer sein, falls der Apparat ganz trocken ist. Man hält daher das Innere desselben gewöhnlich dadurch trocken, dass man eine Schale mit Chlorcalcium oder Bimstein, der mit konzentrierter Schwefelsäure getränkt ist, in das Innere des Gefässes stellt, um die Feuchtigkeit aufzusaugen.

Bevor wir den Abschnitt über elektrische Kräfte verlassen, wird es gut sein hinzuzufügen, dass die *anziehende* Kraft zweier mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladenen Körper ebenfalls dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional ist. Und in jedem Falle, sei es Anziehung oder Abstossung, ist die Kraft in jeder beliebigen Entfernung dem **Produkte der beiden elektrischen Massen direkt proportional.** Wenn man z. B. einzeln der

Digitized by Google

Kugel *m* die Ladung 2, und der Kugel *n* die Ladung 3 gegeben hätte, so würde die zwischen ihnen wirkende Kraft $3 \times 2 = 6$ mal so gross sein, als wenn jede Kugel die Ladung 1 erhalten hätte.

17. Elektrische Masseneinheit. In Folge dieser Gesetze über Anziehung und Abstossung hat man es sehr zweckmässig gefunden, für diejenige elektrische Masse, welche man als Einheit oder Maass nimmt, um andere elektrische Massen zu messen, die folgende Definition aufzustellen: *Die Einheit der Elektrizität ist diejenige Menge derselben, welche auf eine ihr gleiche Menge Elektrizität derselben Art bei einem gegenseitigen Abstande der beiden von 1 Zentimeter eine abstossende Kraft Eins ausübt.* Weitern Aufschluss über das Messen elektrischer Quantitäten findet man in der 20ten und 21ten Vorlesung.

III. VORLESUNG: *Elektrisierung durch Induktion.*

18. Wir haben bisher gesehen, wie 2 geladene Körper sich anziehen oder abstossen können. Man hat bisweilen gesagt, dass es die in den Körpern vorhandenen Elektrizitäten seien, welche sich anziehen oder abstossen; doch da die Elektrizität bekanntlich nur in oder an materiellen Dingen existiert, so ist der Beweis, dass die Elektrizitäten selbst sich gegenseitig anziehen, nur ein indirekter. Trotzdem wird diese Ansicht von gewissen Umständen unterstützt, unter andern von dem elektrischen Einflusse, welchen ein elektrisierter Körper auf einen nicht elektrisierten ausübt.

Angenommen, man reibt eine Glaskugel mit Seide, um dieselbe elektrisch zu machen und nähert sie dann einem unelektrischen Körper; was wird geschehen? Man nehme zu diesem Versuche den in Fig. 10 dargestellten Apparat, welcher aus einer langen, walzenförmigen Metallröhre besteht, die hohl oder solid sein kann und auf einer gläsernen Stütze ruht. Dieser Konduktor (so genannt, weil er aus Metall besteht, welches der Elektrizität einen freien Durchgang durch sein Inneres oder

Digitized by Google

über seine Oberfläche gestattet) ruht auf einer gläsernen Stütze, um das Entweichen der Elektrizität in den Erdboden zu ver-

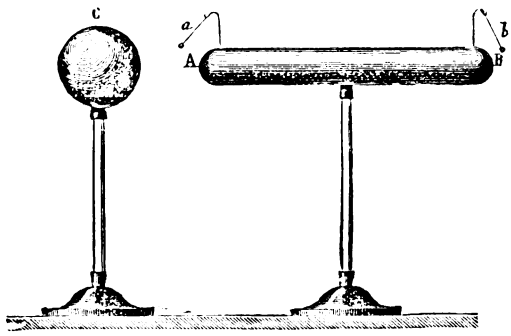

Fig. 10.

hüten; Glas gehört zu den Nicht-Leitern. Nun ergibt sich, dass die + Elektrizität der diesem Konduktor genäherten (aber nicht mit diesem in Berührung gebrachten) Glaskugel auf demselben Elektrizität *induziert,* und dass derselbe, obgleich er nicht gerieben wurde, an seinen beiden Enden sich wie ein elektrisierter Körper verhält. Die Enden des Konduktors ziehen kleine Papierstücke an, und Hollundermarkkugeln, welche man an die Enden des Konduktors anhängt, werden abgestossen. Dagegen findet man, dass der mittlere Teil des länglichen Konduktors keine Spur von Elektrizität zeigt. Eine weitere Untersuchung lässt ferner erkennen, dass die beiden Elektrizitäten an den Enden des Konduktors von entgegengesetzter Art sind, und zwar befindet sich auf dem der + elektrisierten Glaskugel zugekehrten Ende A eine negative Ladung, und auf dem entgegengesetzten Ende B eine ebenso grosse positive Ladung. Daraus geht hervor, dass eine + Ladung negative Elektrizität anzieht und + abstösst, und dass diese Einwirkung auch noch in einer gewissen Entfernung von dem Körper statt hat. Wenn man mit einer — Ladung auf einem Stücke Siegellack begonnen hätte, so würde dieselbe auf dem genäherten Ende des Konduktors A positive, auf dem entgegengesetzten Ende B negative

Digitized by Google

Elektrizität induziert haben. Diese Einwirkung, welche von John Canton im Jahre 1753 entdeckt wurde, heisst elektr. **Induktion** oder *Influenz.* Dieselbe findet noch bei einer beträchtlichen Entfernung statt. Selbst wenn man eine grosse Glasscheibe dazwischen stellt, hat man noch dieselbe Wirkung. Wird aber der elektrisierte Körper entfernt, so verschwinden beide Ladungen und lassen keine Spur zurück, und die Glaskugel enthält genau so viel Elektrizität wie vorher; sie hat nichts von ihrer eigenen Ladung verloren. Man wird sich erinnern, dass man nach der einen Theorie einen + geladenen Körper auffasst als einen solchen, der *mehr* Elektrizität als die Gegenstände in seiner Umgebung hat, während man einen — geladenen als einen Körper auffasst, der *weniger* Elektrizität enthält. Nach dieser Auffassungsweise muss man sagen: Wenn ein Körper, der, wie z. B. die + elektrisierte Glaskugel, mehr Elektrizität enthält, als die Gegenstände seiner Umgebung, in die Nähe eines isolierten Konduktors gebracht wird, so wird die gleichförmige Verteilung der Elektrizität auf jenem Konduktor gestört, indem die Elektrizität von dem dem + Körper nahen Ende wegfliesst, so dass dort weniger als für gewöhnlich zurückbleibt, während an dem andern Ende mehr als für gewöhnlich angesammelt wird. Diese Anschauungsweise erklärt das Verschwinden jeder Spur der Elektrizität in dem Augenblicke, wo der elektrisierte Körper entfernt wird, ohne weiteres, denn der Konduktor kehrt dann in seinen frühern Zustand zurück und zeigt weder +, noch — Elektrizität, indem er weder mehr, noch weniger elektrisch ist, als alle übrigen Gegenstände in seiner Umgebung.

19. Wenn der Konduktor aus 2 Teilen zusammengesetzt ist, der Art, dass dieselben getrennt werden können, noch während der elektrisierte Körper seinen induzierenden Einfluss ausübt, so können die beiden Ladungen nach der Entfernung des elektrisierten Körpers sich nicht mehr vereinigen, sondern jede bleibt auf ihrem respektiven Teile des Konduktors zurück, und kann dann nach Belieben untersucht werden.

Digitized by Google

Wenn der Konduktor nicht durch Glasstützen isoliert, sondern mit dem Erdboden in Berührung gebracht wird, so wird nur das dem elektrisierten Körper zugekehrte Ende elektrisiert. Die abgestossene Elektrizität wird in der Tat so weit wie möglich abgestossen — bis in die Erde. Unter diesen Umständen erhält man nur eine Art von Elektrizität, nämlich die entgegengesetzte Art von der des elktrisierten Körpers, gleich viel, welcher Art diese letztere sei. Man hat in diesem Falle dieselbe Wirkung, als ob ein elektrisierter Körper die Kraft besässe, die entgegengesetzte Art der Elektrizität aus der Erde an sich zu ziehen; doch ist die im vorigen vorgetragene Anschauungsweise korrekter.

Die Grösse der beiden Ladungen, welche auf diese Weise auf einem Konduktor durch Induktion einer in der Nähe befindlichen elektrischen Ladung getrennt werden, hängt von der Grösse dieser Ladung und von der Entfernung des geladenen Körpers vom Konduktor ab. Je stärker der Glasstab elektrisiert und je näher er dem Konduktor gebracht wird, desto grösser ist seine induzierende Kraft. Höchstens aber kann der + Glasstab auf dem genäherten Ende des Konduktors eine negative Ladung induzieren, welche, abgesehen vom Vorzeichen, seiner eigenen Ladung gleich ist, und auf dem entfernten Ende dann eine gleiche Menge von + Elektrizität. Ehe jedoch der elektrisierte Körper so nahe gebracht wird, dass er diese Wirkung hat, tritt gewöhnlich eine andre Erscheinung ein, welche die Sachlage völlig ändert. Wenn nämlich der elektrisierte Körper mehr und mehr dem Konduktor genähert wird, so ziehen sich die entgegengesetzten Ladungen an den beiden sich gegenüberliegenden Oberflächen immer stärker an und sammeln sich hier immer dichter an, bis zuletzt, wenn der elektrisierte Körper sehr nahe gebracht ist, ein Funke überspringt und die beiden Ladungen auf diese Weise sich vereinigen und neutralisieren, während die induzierte + Ladung, welche vorher bis an das andre Ende des Konduktors abgestossen wurde,

Digitized by Google

jetzt als permanente Ladung zurückbleibt, auch nachdem man den elektrisierten Körper entfernt hat.

20. Wir können jetzt mit Hülfe des Prinzips der Induktion erklären, weshalb ein elektrisierter Körper unelektrische Gegenstände anzieht. Man hänge eine leichte Kugel an einem seidenen Faden auf (Fig. 11) und nähere ihr einen geriebenen Glasstab. Die + Ladung des Glases induziert dann eine — Ladung auf der zugewandten Seite, und eine gleiche + Ladung auf der entgegengesetzten Seite der Kugel. Die nähere Hälfte der Kugel wird deshalb angezogen, und die entfernte Hälfte abgestossen; aber die Anziehung überwiegt die Abstossung, weil die angezogene Elektrizität näher als die abgestossene ist. Deshalb wird die Kugel unter dem Einfluss beider Kräfte angezogen. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass eine Kugel aus nicht-leitendem Stoffe, wie z. B. aus Schellack, nicht so stark angezogen wird, wie eine Kugel aus einem leitenden Stoffe. Dies *beweist* an sich, dass die Induktion in der Tat der Anziehung vorausgeht.

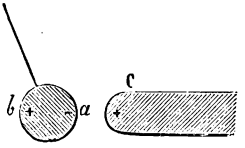

Fig. 11.

21. Induktions-Kapazität. Wir haben bisher angenommen, dass die Elektrizität in die Ferne wirken und diese induzierenden Wirkungen ohne dazwischen befindliche Verbindungsmittel ausüben kann. Dies ist aber nicht der Fall, denn Faraday entdeckte, dass die Luft zwischen dem elektrisierten Körper und dem Konduktor eine sehr wichtige Rolle beim Anstellen dieser Versuche spielte. Hätte man einen andern Körper, z. B. Paraffinöl oder festen Schwefel in den zwischenliegenden Raum gebracht, so würde die Wirkung, welche der elekrisierte Körper in der nämlichen Entfernung hervorgebracht hätte, grösser gewesen sein. Die *Fähigkeit* eines Körpers auf diese Weise die induzierende Kraft eines elektrisierten Körpers durch sich hindurch wirken zu lassen, heisst seine **Induktions-Kapazität** oder seine *induktive Kapazität.* (Vergl. Art. 49 und Vorl. XXII.)

22. Das Elektrophor. Wir sind jetzt im Stande, die

Digitized by Google

Wirkungsweise eines einfachen und sinnreichen Apparates auseinanderzusetzen, welcher von Volta im Jahre 1775 erfunden wurde, in der Absicht, mit Hilfe des Prinzips der Induktion eine unbegrenzte Anzahl elektrischer Ladungen aus einer einzigen Ladung zu gewinnen. Dieser Apparat ist das **Elektrophor** (Fig. 12). Es besteht aus 2 Teilen, einem runden Harzkuchen von circa 30 bis 40 cm Durchmesser, der in eine Form von

Fig. 12.

Metall gegossen ist, und einer runden Scheibe von etwas kleinerem Durchmesser, welche aus Metall oder mit Steinöl überzogenem Holz besteht und mit einem Glasgriff versehen ist. Zur Herstellung des Kuchens kann man Schellack oder Siegellack, oder auch eine Mischung von Harz, Schellack und venetianischem Terpentin nehmen. Eine Platte aus Schwefel thut dieselben Dienste, ist jedoch leicht zerbrechlich. Eine Scheibe von Hartgummi eignet sich vorzüglich zu diesem Zwecke; doch muss man sie von Zeit zu Zeit mit Ammoniak waschen und

Digitized by Google

mit Paraffinöl abreiben, weil der darin enthaltene Schwefel leicht oxidiert und dann Feuchtigkeit anzieht. Beim Gebrauche des Elektrophor's muss man den Harzkuchen mit einem warmen Wolltuche oder, was noch besser ist, mit einem Katzenfell peitschen oder reiben. Darauf stellt man die Scheibe oder den Deckel auf den Kuchen, und berührt erstere einen Augenblick mit dem Finger. Hebt man jetzt den Deckel an dem gläsernen Handgriffe ab, so findet man, dass derselbe stark + elektrisch geworden ist, derart, dass er einen Funken gibt, wenn man ihm den Knöchel der Hand nähert. Hierauf kann man den Deckel wieder auflegen, berühren und wieder abheben und auf diese Weise eine beliebige Anzahl von Funken erhalten, ohne dass die ursprüngliche Ladung des Harzkuchens dadurch merklich vermindert wird.

Die Theorie des Elektrophors ist höchst einfach zu verstehen, falls der Leser nur das oben erklärte Prinzip der Induktion klar begriffen hat. Wenn man zunächst den Harzkuchen mit einem Katzenfell peitscht, so wird seine Oberfläche negativ elektrisch, wie es in Fig. 13 angedeutet ist. Setzt man dann den Metalldeckel darauf, so berührt derselbe in Wirklichkeit (wegen der immer vorhandenen kleinen Unebenheiten) den Kuchen nur

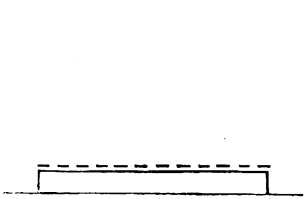

Fig. 13.

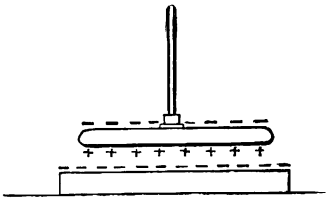

Fig. 14.

in 3 bis 4 Punkten und kann daher als ein isolierter Konduktor in der Nähe eines elektrischen Körpers betrachtet werden. Die — Elektrizität des Kuchens wirkt daher induzierend auf den Metalldeckel, indem sie eine + Ladung auf seine untere Seite hinzieht, und eine negative Ladung nach seiner obern Seite hin abstösst. Diesen Zustand zeigt Fig. 14. Wenn man hierauf den Deckel einen Augenblick mit dem Finger berührt, so

Digitized by Google

wird die — Ladung auf der obern Seite des Deckels (dort befindet sich dieselbe, weil sie von der — Ladung des Kuchens abgestossen wird) von der aus der Erde durch die Hand und den Körper des Experimentierenden zuströmenden Elektrizität neutralisiert. Die angezogene + Ladung bleibt jedoch am Deckel haften, da dieselbe durch die Anziehung der — Ladung des Kuchens gewissermassen gebunden wird. Fig. 15 zeigt die Anordnung, nachdem man den Deckel berührt hat. Wenn man nun zuletzt noch den Deckel mittelst seines Handgriffes abhebt, so wird die zurückgebliebene + Ladung nicht länger auf der untern Seite durch Anziehung gebunden, sondern verteilt sich auf beiden Seiten des Deckels und kann dann, wie schon gesagt wurde, dazu dienen, einen Funken zu liefern. Es ist klar, dass kein Teil der anfänglichen Ladung des Harzkuchens bei

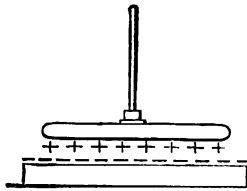

Fig. 15.

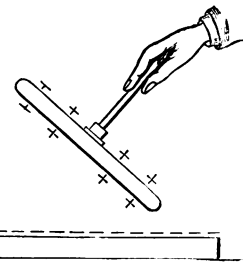

Fig. 16.

diesem Prozesse verbraucht wurde, und deshalb kann man denselben so oft wiederholen, wie man will. Thatsächlich verschwindet allerdings die Ladung des Kuchens nach und nach, zumal wenn die Luft feucht ist. Deshalb muss man von Zeit zu Zeit die ursprüngliche Ladung erneuern, indem man den Kuchen von Neuem mit dem Katzenfell peitscht. Die Mühe, den Deckel bei jedem Versuche mit dem Finger zu berühren, kann man sich dadurch sparen, dass man die Metallform, in welche der Harzkuchen gegossen ist, mit einem Messingstift oder einem Stanniolstreifen versieht, welcher bis auf die obere Seite des Kuchens reicht, so dass ersterer jedesmal den Deckel berührt und auf diese Weise die negative Ladung desselben

Digitized by Google

durch Zuströmen der Elektrizität aus dem Erdboden neutralisiert.

Da man die Elektrizität, welche das Elektrophor auf diese Weise liefert, nicht auf Kosten eines Teils der ursprünglichen Ladung erhält, so ist es von Interesse, die Quelle aufzusuchen, aus welcher hier fort und fort Energie geschöpft werden kann. Denn dieselbe kann nicht ohne den Aufwand einer andern Energie ins Leben gerufen werden, ebensowenig wie eine Dampfmaschine ohne Brennmaterial arbeiten kann. Thatsächlich findet man nun, dass es eine etwas grössere Arbeit ist, den Deckel aufzuheben, wenn er mit der + Elektrizität geladen ist, als wenn er nicht geladen ist; denn im ersteren Falle muss man ausser der Schwere auch noch die Kraft der elektrischen Anziehung überwinden. Es wird also durch die Muskelkraft des Experimentierenden bei dem Abheben des Deckels eine Arbeit geleistet, die etwas grösser ist, als diejenige, welche bei dem Auflegen gewonnen werden könnte, und das ist die wahre Quelle der in den einzelnen Ladungen angesammelten Energie.

23. Kontinuierliche Elektrophore. Die rein mechanische Arbeit, den Deckel mit dem Kuchen in Berührung zu bringen und dann wieder abzuheben, kann maschinenmässig durch geeignete mechanische Vorrichtungen verrichtet werden, welche dann die Erregung dieser Induktions-Ladungen kontinuierlich machen. Das erste dieser **kontinuierlichen Elektrophore** war Bennet's »Verdoppler«, der neueste ist die in der 5ten Vorlesung beschriebenen Maschine von Wimshurst.

24. Freie und gebundene Elektrizität. Wir haben eine elektrische Ladung auf der Oberfläche eines Konduktors als gebunden bezeichnet, falls dieselbe von einer in der Nähe befindlichen Ladung entgegengesetzter Art angezogen wird. Den umgekehrten Ausdruck »*freie* Elektrizität« gebraucht man bisweilen von dem gewöhnlichen Zustande der Elektrizität auf einem geladenen Konduktor, der sich nicht in der Nähe einer Ladung entgegengesetzter Art befindet. Eine *freie* Ladung auf einem isolierten Konduktor entweicht sofort in die Erde, wenn

Digitized by Google

eine leitende Verbindung hergestellt wird, wie wir in der nächsten Vorlesung erklären werden. Es ist dabei unwesentlich, welcher Punkt des Konduktors berührt wird. Für den in Fig. 10 dargestellten Fall z. B., wo ein + elektr. Körper — Elektrizität auf dem zugekehrten, und + Elektrizität auf dem abgekehrten Ende eines isolierten Konduktors induziert, ist die negative Ladung gebunden, da sie angezogen wird, während die + Ladung am andern Ende frei ist, da sie abgestossen wird; und wenn der isolierte Konduktor von einem auf dem Erdboden Stehenden berührt wird, so entweicht die freie Elektrizität durch seinen Körper in die Erde, während die gebundene Elektrizität zurückbleibt, gleichviel, ob der Experimentierende den Konduktor an diesem oder jenem Ende oder in der Mitte berührt.

25. Induktions-Methode, um das Goldblattelektroskop zu laden. Der Leser wird jetzt in der Lage sein, die Methode zu verstehen, nach welcher ein Goldblattelektroskop mit derjenigen Elektrizität geladen werden kann, welche der zu seiner Ladung benutzten entgegengesetzt ist. In der zweiten Vorlesung haben wir angenommen, dass ein Elektroskop auf die Weise geladen wurde, dass man den Knopf mit dem elektrisierten Körper berührte und so gleichsam einen geringen Teil der Ladung in die Goldblätter strömen liess. Ein mit Seide geriebener Glasstab, der also + elektrisch ist, würde den Goldblättern auf diese Weise offenbar + Elektrizität mitteilen.

Nehmen wir jedoch an, dass der geriebene Glasstab einige Zentimeter hoch über den Knopf des Elektroskopes gehalten wird, wie es Fig. 7 wirklich zeigt. Auch bei dieser Entfernung divergieren die Goldblätter; und diese Wirkung ist eine Folge der Induktion. Die Goldblätter, der Messingdraht und der Knopf bilden einen zusammenhängenden Leiter, der durch die Glasflasche vom Boden isoliert ist. Die Nähe der + Elektrizität des Glasstabes wirkt induzierend auf diesen isolierten Konduktor, und induziert — Elektrizität auf dem nahen Ende, d. h. dem Knopfe und + Elektrizität auf dem fernen Ende, d. h. auf den Goldblättern, welche divergieren. Von diesen beiden

Digitized by Google

induzierten Ladungen ist die — auf dem Knopfe gebunden, während die + auf den Blättern frei ist. Wenn jetzt, noch während der elektrisierte Glasstab über dem Elektroskope gehalten wird, ein auf dem Erdboden Stehender den Knopf berührt, strömt die eine dieser beiden induzierten Ladungen in den Boden, und zwar die freie Ladung — nicht die des Knopfes selbst, denn diese war gebunden, sondern jene auf den Goldblättern, welche frei war — und die Goldblätter fallen sofort zusammen. Es bleibt nur die — Ladung auf dem Knopfe zurück, welche solange gebunden ist, wie die + Ladung des Glasstabes in der Nähe ist und sie anzieht. Wenn jedoch nun der Glasstab schnell weggezogen wird, so ist die — Ladung auf dem Knopfe nicht mehr gebunden, sondern frei, und strömt folglich zum Teil auch in die Blätter, welche dann wieder divergieren, diesmal jedoch in Folge ihrer — Elektrizität.

26. Der Rückschlag. Wenn ein geladener Konduktor plötzlich entladen wird, so hat man oft beobachtet, dass in der Nähe befindliche Personen eine Entladung spüren, welche sogar auf Elektroskope wirken oder Funken geben kann. Diese unter dem Namen *Rückschlag* bekannte Erscheinung ist eine Folge der Induktion. Denn durch das Vorhandensein eines geladenen Konduktors wird in benachbarten Körpern eine Ladung entgegengesetzter Art induziert, und bei der Entladung des Konduktors können diese benachbarten Körper ihre induzierte Ladung ebenfalls plötzlich in die Erde oder in andere leitende Körper entladen. Einen Rückschag fühlen oft auf dem Erdboden stehende Personen in dem Augenblicke, wo ein Blitzstrahl einen in ihrer Nähe befindlichen Gegenstand getroffen hat.

IV. VORLESUNG: *Leitung und Verteilung der Elektrizität.*

27. Leitung. Am Ende der ersten Vorlesung setzten wir auseinander, dass gewisse Körper, z. B. die Metalle, die Elektrizität leiten, während andere zu den Nichtleitern oder Isolatoren gehören. Diese Entdeckung verdanken wir Stephen Gray,

Digitized by Google

welcher im Jahre 1729 fand, dass ein Kork, der in das eine Ende einer geriebenen Glasröhre gesteckt wurde, ja sogar ein in diesen Kork gestecktes Stück Holz, leichte Körper anzogen. Ebenso fand er, dass Metalldraht und Bindfaden die Elektrizität leiteten, Seide dagegen nicht.

Wir können diese Versuche wiederholen mit einem Glasstabe (Fig. 17), welcher mit einem Korke oder einem Stück

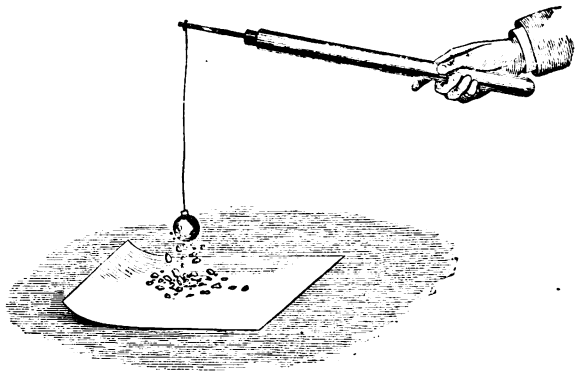

Fig. 17.

Holz versehen ist. Hängt man an das Ende desselben eine Metallkugel oder einen Messingknopf mittelst eines leinenen Fadens oder eines Drahtes, so findet man, dass die Kugel die Eigenschaft erhält, leichte Körper anzuziehen, nachdem der Glasstab gerieben wurde. Nimmt man jedoch einen trockenen seidenen Faden, so strömt keine Elektrizität in die Kugel hinab.

Es gelang Gray sogar, eine elektrische Ladung durch einen von seidenen Oesen getragenen Hanffaden über 700 Fuss weit zu leiten. Etwas später gelang es Du Fay, die Elektrizität durch einen angefeuchteten Faden keine geringere Strecke als 1256 Fuss weit zu leiten, und so die Leitungsfähigkeit von Feuchtigkeit zu beweisen. Seit jener Zeit datiert die Einteilung der Körper in Leiter und Nichtleiter.

Digitized by Google

Diese Einteilung kann man jedoch nicht völlig aufrecht erhalten, da eine grosse Klasse von Stoffen als teilweise Leiter eine Zwischenstellung einnehmen. Trockenes Holz ist z. B. ein schlechter Leiter und auch ein schlechter Nichtleiter; es leitet gut genug, um die durch Reibung erregte Elektrizität hoher Spannung durchzulassen, aber es ist ein schlechter Leiter für die von kleinen Voltaischen Batterieen herrührende Elektrizität von verhältnismässig geringer Spannung. Von Körpern, welche sehr schlechte Leiter sind, sagt man, dass sie der durch sie strömenden Elektrizität einen grossen **Widerstand** bieten. In der That gibt es keinen so guten Leiter, dass er überhaupt keinen Widerstand böte, und umgekehrt gibt es keinen Körper mit so grossem Widerstande, dass er nicht noch ein wenig leitete. Sogar Silber, welches von allen bekannten Körpern am besten leitet, bietet der strömenden Elektrizität im geringen Grade noch Widerstand, und andererseits gestattet ein Nichtleiter, wie z. B. Glas, obschon sein Widerstand viele Millionen mal grösser ist, als der eines beliebigen Metalls, dennoch einer sehr kleinen Menge von Elektrizität den Durchgang. In der folgenden Tabelle sind die aufgezählten Körper so geordnet, dass jeder vorhergehende besser als der nachfolgende leitet:

Silber	Gute Leiter.
Kupfer	
Andere Metalle . .	
Holzkohle	
Wasser	
Der menschl. Körper	Teilweise Leiter.
Baumwolle	
Trockenes Holz . .	
Marmor	
Papier	

Digitized by Google

Oele	Nichtleiter.
Porzellan	
Wolle	
Seide	
Harz	
Guttapercha . . .	
Schellack	
Ebenholz	
Paraffin	
Glas	
Trockene Luft . .	

Eine einfache Methode, um durch den Versuch zu erkennen, ob ein Körper ein Leiter ist oder nicht, besteht darin, dass man den zu prüfenden Körper in die Hand nimmt und den Knopf eines geladenen Goldblattelektroskopes mit demselben berührt. Ist der Körper ein Leiter, so entweicht die Elektrizität durch ihn und durch den Körper des Experimentierenden in die Erde, und das Elektroskop ist alsdann entladen. Durch gute Leiter strömt die Elektrizität so schnell, dass die Entladung thatsächlich momentan statt findet. Weiteres über diese Frage findet man in der 23. Vorlesung.

28. Verteilung der Elektrizität auf den Körpern. Wenn man an einer Stelle eines Nichtleiters Elektrizität erregt, so bleibt dieselbe an dieser Stelle, und verbreitet sich nicht über die ganze Oberfläche oder doch jedenfalls nur äusserst langsam. Wenn z. B. ein Glasstab an seinem einen Ende gerieben wird, so wird nur dieses Ende elektrisch. Wenn ein warmer Harzkuchen an einer Stelle mit einem Tuchlappen gerieben wird, so zieht nur diese Stelle leichte Körper an. Die Sache ist jedoch ganz anders, wenn man irgend einem Teile eines isolierten Leiters eine elektrische Ladung mitteilt, denn letztere verbreitet sich *sofort* über die ganze Oberfläche, jedoch im allgemeinen nicht gleichmässig über alle Punkte derselben.

29. Die Ladung hat ihren Sitz auf der Oberfläche. Eine elektrische Ladung hat ihren Sitz nur auf der Oberfläche

Digitized by Google

eines Leiters. Ein Beweis hierfür ist der Umstand, dass es für die Verteilung gleichgültig ist, woraus das Innere eines Leiters besteht; der Leiter kann festes Metall sein oder hohl oder selbst aus mit Stanniol oder Blattgold überzogenem Holz bestehen: vorausgesetzt, dass die Gestalt die nämliche ist, verteilt sich in allen Fällen die Ladung in genau derselben Weise über die Oberfläche. Es gibt auch mehrere Methoden, um diese wichtige Thatsache durch den Versuch zu beweisen. Man lege eine hohle Metallkugel (Fig. 18), welche oben eine Oeffnung

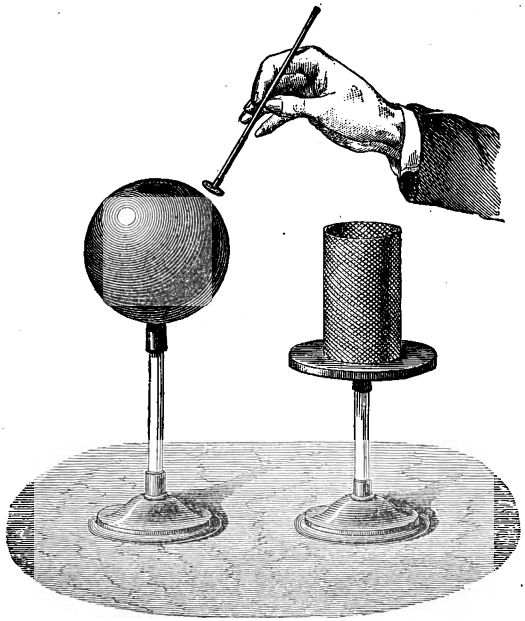

Fig. 18.

hat, auf eine isolierende Stütze und lade erstere, indem man ein paar Funken von einem Elektrophor auf sie überspringen lässt. Dass sich im Innern der Kugel dann keine Ladung befindet, kann man auf folgende Weise zeigen: Um die Art der Elektrizität eines geladenen Körpers zu erkennen, ist es zweck-

Digitized by Google

mässig, ein Mittel zu haben, einen kleinen Teil der Ladung absondern und dann prüfen zu können. Um solch eine Probe zu erhalten, gebraucht man einen als **Probe-Platte** bekannten Apparat. Derselbe besteht aus einer kleinen Scheibe von Kupferblech oder Goldpapier, welche an das eine Ende eines dünnen Glasstabes befestigt ist. Legt man diese Scheibe an irgend einer Stelle auf die Oberfläche eines elektrischen Körpers, so strömt ein Teil der Elektrizität in dieselbe; man kann sie dann wegnehmen und die so erhaltene Probe mit einem Goldblattelektroskop in der gewöhnlichen Weise prüfen. Für manchen Zweck eignet sich ein an einem Glasstab befestigtes Metallkügelchen besser, als eine flache Scheibe. Wenn eine solche Probeplatte an die äussere Seite unserer elektrisierten Hohlkugel gehalten und dann mit dem Knopfe eines Elektroskopes in Berührung gebracht wird, so divergieren die Goldblätter, zeigen also das Vorhandensein einer Ladung an. Wenn man jedoch die Probeplatte vorsichtig durch die Oeffnung führt, die *innere Seite* der Kugel mit ihr berührt, und sie dann abhebt, so findet man, dass die innere Seite nicht elektrisch ist. Eine elektrisierte Zinnkanne zeigt ein ähnliches Resultat; desgleichen auch ein Cylinder von Drahtgeflecht.

30. Biot's Versuch. Biot bewies dieselbe Thatsache auf anderm Wege. Eine Kupferkugel wurde elektrisiert und isoliert. Zwei hohle Halbkugeln von Kupfer, welche einen etwas grösseren Durchmesser hatten und mit gläsernen Handgriffen versehen waren, wurden dann von aussen über die Kugel gedeckt (Fig. 19). So lange sie nicht mit ihr in Berührung kamen, blieb die Ladung auf der innern Kugel; wenn jedoch die äussere Hülle die innere Kugel auch nur einen Augenblick berührte, strömte die gesamte Elektrizität nach aussen, und wenn dann die Halbkugeln wieder getrennt und abgehoben wurden, so ergab sich, dass die innere Kugel jetzt vollständig entladen war.

31. Weitere Erklärung. Ohne Zweifel ist die Erklärung für dies Verhalten der Elektrizität in der früher erwähnten

Digitized by Google

Eigenschaft zu suchen, welche beide Arten der Elektrizität gleichmässig besitzen, dass nämlich jede sich selbst abstösst. Aus

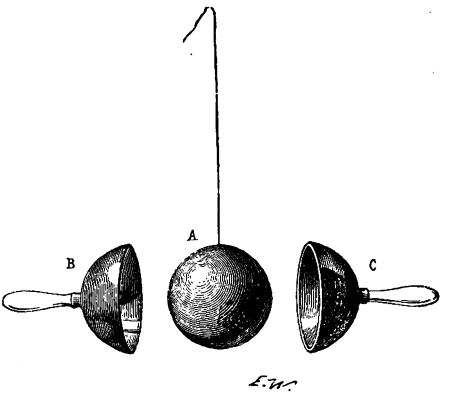

Fig. 19.

diesem Grunde sucht sie so weit wie möglich vom Zentrum sich zu entfernen und bleibt auf der Oberfläche. Ein wichtiger Satz, des Inhalts, dass im Innern eines geschlossenen Leiters keine elektrische Kraft vorhanden ist, soll in der 20. Vorlesung bewiesen werden; einstweilen muss man beachten, dass die Beweise vorläufig nur das Nichtvorhandensein einer *freien* elektrischen Ladung im Innern hohler Leiter darthun sollen. Man hat noch viele andre Experimente erdacht, um das zu beweisen. So zeigte Terquem, dass man ein Paar Goldblätter, welche innerhalb eines Drahtgeflechts aufgehängt waren, nicht zum divergieren bringen konnte, falls jenes elektrisiert wurde. Faraday verfertigte einen kegelförmigen Beutel aus Leinen-Gaze, der, wie in Fig. 20, von einer isolierenden Stütze getragen wurde und mit Seidenfäden versehen war, so dass seine innere Seite nach aussen gekehrt werden konnte. Derselbe wurde geladen und mit Hilfe der Probeplatte und des Elektroskops gezeigt, dass die Ladung sich auf der äussern Seite des Beutels befand. Dann wurde die innere Seite nach aussen gezogen, und es stellte sich heraus, dass die Elektrizität wieder auf der Seite war, welche jetzt die *äussere* war. Einen höchst überraschenden Ver-

Digitized by Google

such stellte Faraday mit einem hohlen Würfel von 12 Fuss Kantenlänge an, der aus mit Stanniol überzogenem Holz ver-

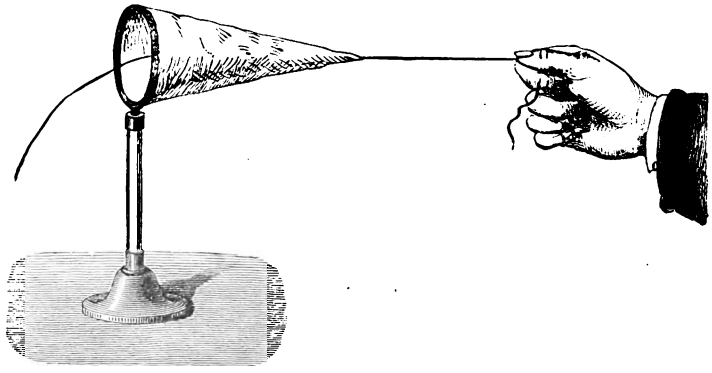

Fig. 20.

fertigt, isoliert, und durch eine kräftge Maschine geladen war, so dass grosse Funken und Strahlenbüschel überall von seiner äussern Fläche hervorblitzten. In diesen Würfel stellte Faraday eines seiner empfindlichsten Elektroskope; doch konnte er, wenn dasselbe innerhalb des Würfels war, nicht den geringsten Einfluss auf dasselbe wahrnehmen.

32. Anwendungen. Man hat dies bei der Konstruktion empfindlicher Elektrometer und andrer Apparate benutzt, welche wirksam vor dem Einflusse elektrischer Körper dadurch geschützt werden können, dass man sie mit einem dünnen Metall-Futterale umgibt, welches überall geschlossen ist, mit Ausnahme derjenigen Stellen, wo zum Zwecke der Beobachtung Oeffnungen angebracht werden müssen. Der verstorbene Professor Maxwell hat auch den Vorschlag gemacht, Gebäude vor dem Blitz dadurch zu schützen, dass man ihre äussere Seite mit einem Netzwerk von Drähten überzieht.

33. Scheinbare Ausnahmen. Es gibt zwei scheinbare Ausnahmen von dem Gesetze, dass die Elektrizität sich nur auf der äussern Seite der Leiter befindet. 1) Wenn sich im Innern des hohlen Leiters elektrische, isolierte Körper befinden, so

Digitized by Google

wirken dieselben induzierend und ziehen die entgegengesetzte Art der Elektrizität nach der inneren Seite des hohlen Leiters. 2) Wenn die Elektrizität als ein elektrischer Strom fliesst, so fliesst sie durch die Substanz des Leiters. — Das Gesetz beschränkt sich also auf in Ruhe befindliche Elektrizität, d. h. auf *statische* Ladungen.

34. Faraday's Eis-Eimer-Versuch. Es verdient hier ein Versuch Faraday's Beachtung, welcher den Einfluss zeigt, den die Induktion bei diesen Naturerscheinungen ausübt. Faraday liess eine geladene Metallkugel langsam in einen hohlen Leiter hinab, der durch einen Draht mit einem Goldblatt-Elektroskop verbunden war (Fig. 21) und beobachtete den Erfolg. Da ein zinnerner Eiseimer zu diesem Zwecke sich gut eignet, so hat dieser Versuch darnach seinen Namen bekommen, obgleich jeder andre hohle Leiter, z. B. eine Zinnbüchse oder eine silberne Kanne, auf eine Glasstütze gestellt, natürlich ebenso zweckmässig sein würde. Man beobachtete nun die folgenden Erscheinungen: Nehmen wir an, die Kugel hätte eine + Ladung: wird dieselbe in den hohlen Konduktor hinabgelassen, so beginnen die Goldblätter zu divergieren, denn die Ladung wirkt induzierend und zieht eine — Ladung auf die innere Seite und stösst eine + Ladung nach der äussern Seite ab. Die Goldblätter divergieren mehr und mehr, bis die Kugel gerade mitten in dem hohlen Leiter ist; von diesem Augenblicke an findet keine grössere Divergenz mehr statt. Bringt man nun die Kugel mit der innern Seite des Eimers in Berührung, so divergieren die Goldblätter nach wie vor, und zieht man jetzt die Kugel heraus, so ergibt sich, dass sie alle ihre Elektrizität ver-

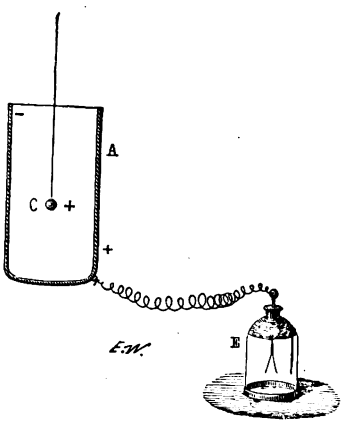

Fig. 21.

Digitized by Google

loren hat. Der Umstand, dass die Goldblätter nicht stärker divergieren, nachdem die Kugel die Innenseite berührte, als im Augenblicke vorher, beweist, dass, wenn die geladene Kugel gerade mitten in dem hohlen Leiter ist, jede der induzierten Ladungen genau ebenso gross ist, wie die Ladung der Kugel selbst; die innere — Ladung hebt genau in dem Augenblicke ihrer Berührung die Ladung der Kugel auf, während die ebenso grosse äussere Ladung unverändert bleibt. Ein *elektrischer »Käfig«*, wie z. B. dieser Eisenmer, gibt, wenn derselbe mit einem Elektroskope oder Elektrometer in Verbindnng gebracht wird, ein ausgezeichnetes Mittel an die Hand, um die Ladung irgend eines Körpers zu prüfen, welcher in das Innere des »Käfigs« hineinpasst. Denn ohne den geringsten Teil der Ladung des Körpers zu verbrauchen (was wir bei Anwendung der Methode mit der Probe-Platte nicht vermeiden können) können wir die auf die äussere Seite des Käfigs abgestossene, induzierte Ladung prüfen, und wir wissen, dass diese genau ebenso gross und von derselben Art ist, wie die des geladenen und in den Käfig eingesenkten Körpers.

35. **Verteilung der Ladung.** Eine elektrische Ladung verteilt sich im allgemeinen nicht gleichförmig über die Oberfläche der Körper. Der Versuch zeigt, dass sich an den Kanten und Ecken der Körper mehr Elektrizität befindet, als an den flachen Stellen derselben. Diese Verteilung kann man aus der in der 20. Vorlesung dargethanen Theorie herleiten, vorläufig aber wollen wir einige der hauptsächlichsten Fälle angeben, deren wirkliches Vorhandensein gezeigt werden kann. Der Ausdruck **„elektrische Dichte“** wird gebraucht, um die Menge der Elektrizität an irgend einem Punkte einer Oberfläche zu bezeichnen; *die elektrische Dichte in einem Punkte ist gleich der Zahl der elektrischen Einheiten pro Flächeneinheit* (d. h. pro Quadrat-Zentimeter), wobei die Verteilung über diese kleine Fläche als gleichmässig vorausgesetzt wird.

a) **Kugel.** Die Verteilung einer Ladung auf einer isolierten Kugel von leitendem Material ist gleichförmig, vorausgesetzt

Digitized by Google

dass sich in der Nähe der Kugel keine andern Leiter und andre elektrische Körper befinden; oder mit andern Worten: die Dichte der Elektrizität ist in allen Punkten der ganzen Kugel dieselbe, sie ist gleichförmig. Dies wird veranschaulicht durch die punktierte Linie um die Kugel in Fig. 22 *a*, welche überall

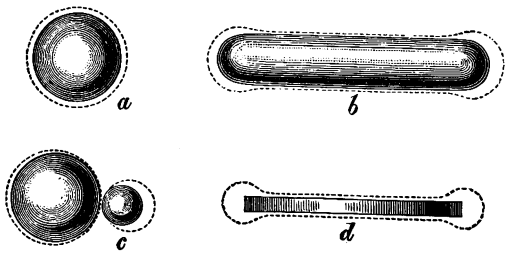

Fig. 22.

von der Kugel denselben Abstand hat, und eine gleiche Dicke der Elektrizität in allen Punkten der Oberfläche andeuten soll. Es muss in Erinnerung gebracht werden, dass die Ladung in Wirklichkeit überhaupt keine wahrnehmbare Dicke besitzt; sie haftet an oder auf der Oberfläche; aber man kann nicht sagen, dass sie eine Schicht auf derselben bildet.

b) **Cylinder mit abgerundeten Enden.** Auf einem verlängerten Leiter, wie derselbe häufig bei elektrischen Apparaten Anwendung findet, ist die Dichte am grössten an den Enden, wo die Krümmung der Oberfläche am stärksten ist.

c) **Zwei sich berührende Kugeln.** Wenn 2 sich berührende Kugeln isoliert und geladen werden, so ergibt sich, dass die Dichte an denjenigen Stellen am grössten ist, welche am weitesten vom Berührungspunkte entfernt sind, am geringsten dagegen in der Spalte zwischen den Kugeln. Wenn die Kugeln verschieden gross sind, so ist die Dichte grösser auf der kleinern Kugel, deren Oberfläche stärker gekrümmt ist. Auf einem **eiförmigen** oder **birnenförmigen** Leiter ist die Dichte am grössten an dem schmalen Ende. Auf einem **Kegel** ist die Dichte an der Spitze am grössten; und wenn der Kegel in eine scharfe Spitze ausläuft, so ist hier die Dichte bei weitem

Digitized by Google

grösser, als in irgend einem andern Punkte. In einem Punkte kann die Dichte der angesammelten Elektrizität in der That so gross sein, dass die benachbarten Luftmoleküle elektrisiert und dann abgestossen werden, so dass auf diese Weise ein fortwährender Verlust der elektrischen Ladung statt findet. Deshalb müssen Spitzen und scharfe Kanten an elektrischen Apparaten stets vermieden werden, ausgenommen in dem Falle, wo eine Entladung besonders gewünscht wird.

d) **Flache Scheibe.** Die Dichte einer Ladung auf einer flachen Scheibe ist, wie wir erwarten konnten, an den Kanten grösser als auf den flachen Oberflächen; dagegen ist die Verteilung über die flachen Oberflächen nahezu gleichförmig.

Diese verschiedenen Thatsachen kann man bestätigen, indem man eine kleine Probeplatte hinter einander an verschiedene Stellen der elektrisierten Körper anhält und darauf die von der Probeplatte aufgenommene Menge der Elektrizität durch ein Elektroskop oder ein Elektrometer prüft. Coulomb, welcher mathematisch sowohl wie experimentell viele der wichtigen Fälle der Verteilung untersuchte, gebrauchte die Torsionswaage, um seine Rechnungen zu prüfen. Er untersuchte auf diese Weise den Fall des Umdrehungsellipsoides, und fand, dass die Dichte der Ladung in den Endpunkten der Achsen den Längen dieser Achsen proportional war. Er zeigte auch, dass die Dichte der Ladung in einem beliebigen andern Punkte der Oberfläche des Ellipsoids der Länge des Lothes proportional ist, welches man vom Zentrum auf die Tangentialebene jenes Punktes fällen kann. Auch Riess untersuchte verschiedene interessante Fälle der Verteilung. Er fand, dass die Dichte in den Mitten der Kanten eines Würfels fast $2^1/_2$ mal so gross war, als die Dichte in der Mitte einer Seitenfläche; während die Dichte in einer Ecke des Würfels mehr als vier mal so gross war.

36. Wiederverteilung der Ladung. Wenn ein Teil der Ladung eines isolierten Leiters weggenommen wird, so verteilt sich der Rest der Ladung sofort wieder in derselben Weise über die Oberfläche, wie die ursprüngliche Ladung, voraus-

Digitized by Google

gesetzt, dass dieselbe ebenfalls *isoliert* ist, d. h. dass keine andern Leiter oder geladene Körper in der Nähe sind, welche durch komplizierte Induktionswirkungen die Verteilung stören könnten.

Wenn ein Leiter mit einer gewissen Menge Elektrizität geladen ist und ein anderer Leiter von derselben Grösse und Gestalt (doch ungeladen) einen Augenblick lang mit ihm in Berührung gebracht und dann wieder von ihm getrennt wird, so wird man finden, dass die Ladung sich gleichmässig auf beide verteilt hat. Auf dieselbe Weise kann eine Ladung in drei oder mehr gleiche Teile geteilt werden, indem sie gleichzeitig auf 3 oder mehr gleiche und ähnliche Leiter verteilt wird, welche zur Berührung gebracht werden.

Wenn 2 gleiche Metallkugeln, welche an seidenen Schnüren aufgehängt und mit ungleichen Mengen von Elektrizität geladen sind, einen Moment lang mit einander in Berührung gebracht und dann wieder getrennt werden, so findet man, dass sich die Ladung gleichmässig verteilt hat, indem jetzt die Ladung jeder einzelnen Kugel gleich der halben Summe beider Ladungen ist. Dies lässt sich auch auf den Fall von Ladungen entgegengesetzter Art ausdehnen. Nehmen wir z. B. an, dass von 2 ähnlichen Leitern der eine mit einer + Ladung von 5 Einheiten, der andre mit 3 Einheiten negativer Elektrizität geladen wäre, so wird jeder nach gegenseitiger Berührung und Trennung eine + Ladung von einer Einheit haben; denn die algebraische Summe von + 5 und — 3 ist + 2, welche auf die beiden gleichen Leiter verteilt, für jeden + 1 bringt.

37. Kapazität der Leiter. Wenn die Leiter von ungleicher Grösse oder Gestalt sind, so sind die Mengen, welche die einzelnen Leiter bei dieser Wiederverteilung erhalten, nicht gleich, sondern proportional der elektrischen *Kapazität* der Leiter. Die Definition von **Kapazität** in ihrer Beziehung zu »elektrischer Menge« findet man in Art. 246, Vorlesung 20. Wir können jedoch schon hier bemerken, dass zwei isolierte Leiter von derselben Gestalt, aber von verschiedener Grösse,

Digitized by Google

in Bezug auf ihre elektrische *Kapazität* sich von einander unterscheiden; denn dem grösseren muss eine grössere elektrische Menge mitgeteilt werden, damit seine Oberfläche in demselben Grade elektrisch wird. Man gebraucht in diesem Zusammenhange den Ausdruck *Potential* in folgendem Sinne: Eine gegebene Elektrizitätsmenge elektrisiert einen isolierten Körper bis zu einem gewissen, von seiner Kapazität abhängigen Potentiale (oder bis zu einer gewissen Kraft, elektrische Arbeit zu verrichten). Wird eine grosse *Elektrizitätsmenge* einem Leiter von geringer *Kapazität* mitgeteilt, so wird derselbe bis auf ein sehr hohes *Potential* elektrisiert; gerade so wie eine grosse Wassermasse, welche in ein enges Gefäss gegossen wird, die Wasserfläche bis auf ein hohes Niveau im Gefässe bringt. Die genaue Definition des Potentials, ausgedrückt durch die gegen die elektrischen Kräfte verbrauchte Energie, findet man in der Vorlesung über Elektrostatik (Art. 237).

Es wird sich als zweckmässig herausstellen, einen + elektrischen Körper als einen solchen zu bezeichnen, der auf ein *positives oder hohes Potential* elektrisiert ist; während man einen — elektrischen Körper als einen solchen ansehen kann, der auf ein *niedriges oder negatives Potential* elektrisiert ist. Und gerade so wie wir von dem Meeresniveau als Null-Niveau ausgehen, und danach die Höhe der Berge und die Tiefe der Bergwerke messen, indem wir das Meeresniveau als einen bequemen Ausgangspunkt für Niveauunterschiede benutzen, ebenso nehmen wir das Potential der Erdoberfläche (denn die Erdoberfläche ist immer bis zu einem gewissen Grade elektrisch) als *Null-Potential* und benutzen dasselbe als einen bequemen Ausgangspunkt, von wo wir Unterschiede des elektrischen Potentials messen können.

V. VORLESUNG: *Elektrisiermaschinen.*

38. Um sich grössere Vorräte von Elektrizität zu verschaffen als diejenigen sind, welche man durch Reiben eines

Digitized by Google

Stabes von Glas oder Schellack erhält, hat man **Elektrisiermaschinen** konstruiert. Jede Elekrisiermaschine besteht aus zwei Teilen, von denen der eine zum Erzeugen, der andre zum Ansammeln der Elektrizität dient. Die Erfahrung hat gelehrt, dass die Mengen positiver und negativer Elektrizität, welche durch Reiben an den Oberflächen der an einander geriebenen Körper erregt werden, von der Dauer des Reibens, der Grösse der geriebenen Oberflächen, und auch von der Natur der gebrauchten Körper abhängig sind. Wenn die beiden Körper, welche man an einander reibt, auf der in Art. 5 angegebenen elektrischen Liste nahe zusammen stehen, so ist die elektrische Wirkung ihrer gegenseitigen Reibung nicht so gross, als wenn man 2 in jener Reihe weit von einander getrennte Körper wählt. Um die grösstmögliche Wirkung zu erzielen, sollte man den am meisten + und den am meisten — Körper nehmen, die zur Konstruktion einer Maschine tauglich wären, und die grösste statthafte Oberfläche derselben der Reibung unterwerfen, indem man dafür sorgt, dass die beweglichen Teile einen hinreichenden mit der nötigen Geschwindigkeit vereinbaren Druck auf einander ausüben.

Die erste Form einer Elektrisiermaschine erfand Otto von Guericke in Magdeburg; dieselbe bestand aus einer an einer Spindel befestigten Schwefelkugel, welche mit der trockenen Handfläche während ihrer Rotation gerieben wurde. Mit dieser Vorrichtung entdeckte er die elektrischen Funken und die Abstossung gleichartig elektrisierter Körper. Isaac Newton ersetzte von Guericke's Schwefelkugel durch eine solche von Glas. Etwas später wurde die Form der Maschine durch verschiedene deutsche Elektriker verbessert; von Bose fügte einen Kollektor oder »Hauptkonduktor« hinzu, in Gestalt einer Eisenröhre, welche zum Zwecke der Isolierung von einer auf Harzkuchen stehenden Person getragen oder an seidenen Schnüren aufgehängt wurde; Winckler in Leipzig substituierte als Reibzeug statt der Hand ein ledernes Kissen; und Gordon in Erfurt gab der Maschine eine bequemere Konstruktion, indem er statt

Digitized by Google

einer Glaskugel einen Glascylinder anwandte. Die Elektrizität wurde von dem elektrisierten Cylinder resp. der elektrisierten Kugel nach dem Hauptkonduktor längs einer Metallkette geführt, welche über die Kugel gehängt war. Ein mit Spitzen versehener Kollektor wurde erst nach Franklin's berühmten Untersuchungen über die Wirkungsweise der Spitzen angewandt. Um das Jahr 1760 konstruierten De la Fond, Planta, Ramsden und Cuthbertson Maschinen mit Glasscheiben statt der Cylinder. Die einzigen wichtigen Aenderungen seit ihrer Zeit sind die Ersetzung des Glases durch *Ebonit* und die Erfindung der auf dem Prinzipe der Induktion und Konvektion beruhenden Maschinen.

39. Die Cylinder-Elektrisiermaschine. Dieselbe besteht, wie sie gewöhnlich konstruiert wird, aus einem an einer horizontalen Achse befestigten Glascylinder, welcher durch eine Handhabe gedreht werden kann. Gegen den Cylinder wird von hinten ein ledernes, mit Pferdehaaren ausgestopftes Kissen gedrückt, dessen Oberfläche mit einem gepulverten Zink- oder Zinnamalgam überzogen ist. Ein an dem Kissen befestigter seidener Lappen bedeckt die obere Hälfte des Cylinders. Vor

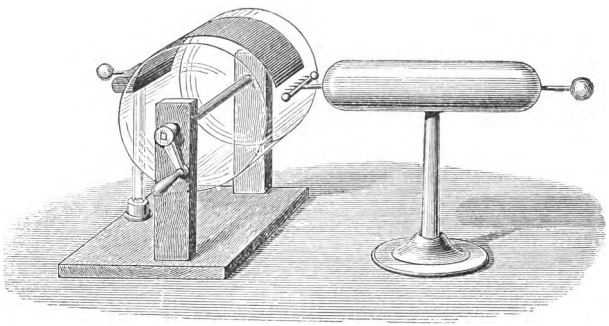

Fig. 23.

dem Cylinder befindet sich der »Hauptkonduktor«, welcher aus Metall besteht, und gewöhnlich die Gestalt eines länglichen Cylinders mit halbkugelförmigen Enden hat; derselbe ruht auf einer Glasstütze. An dem dem Glascylinder nächsten Ende des

Digitized by Google

Hauptkonduktors ist ein Stab befestigt, welcher eine Reihe feiner Metallspitzen trägt, dem Aussehen nach einem Rechen gleich; das andere Ende trägt gewöhnlich einen in einen Messingknopf auslaufenden Stab. Das Gesamtbild der Maschine zeigt Fig. 23. Wird der Handgriff gedreht, so erzeugt die Reibung zwischen dem Glase und der amalgamierten Oberfläche des Reibzeuges eine kräftige elektrische Aktion; und die Elektrizität erscheint als + Ladung auf dem Glase, während auf dem Reibzeuge eine — Ladung zurückbleibt. Der Hauptkonduktor sammelt diese Ladung durch folgenden Vorgang an: Indem die + Ladung auf dem Glase im Kreise herumgeführt wird, wirkt sie induzierend auf den länglichen isolierten Konduktor, indem sie eine + Ladung nach dem entfernten Ende abstösst und auf dem nahen Ende eine — Ladung anzieht. Der Zweck der Spitzenreihe besteht darin, in kontinuierlicher Entladung negativ elektrisierte Luftteilchen nach der anziehenden Ladung auf dem Glase zu treiben, welches dadurch neutralisiert wird; auf diese Weise kommt das Glas an das Reibzeug im neutralen Zustande und kann dann von neuem erregt werden. Diese Wirkung der Spitzen wird bisweilen, obgleich weniger richtig, so erklärt, dass man sagt, die Spitzen saugen die + Elektrizität aus dem Glase. Wenn man auch die — Ladung des Reibzeuges zu sammeln wünscht, muss das Kissen auf einer isolierenden Stütze ruhen und auf der Rückseite mit einem Metallknopfe versehen sein. Diese Erfindung, welche beide Arten der Ladung nach Belieben zu gebrauchen erlaubt, verdankt man Nairne. Gewöhnlich benutzt man jedoch nur die + Ladung und verbindet das Reibzeug durch eine Kette mit der Erde, indem man auf diese Weise die — Ladung neutralisiert.

40. Die Scheiben-Elektrisiermaschine. Die Scheiben-Maschine konstruiert man, wie ihr Name andeutet, aus einer kreisförmigen Scheibe von Glas oder Ebonit und versieht dieselbe gewöhnlich mit 2 Paar Reibzeugen aus doppelten Kissen, welche die Scheibe zwischen sich reiben, und an ihrer höchsten und tiefsten Stelle angebracht sind. Dieselben sind mit Seiden-

Digitized by Google

lappen versehen, von denen jeder einen Quadranten des Kreises bedeckt. Der Hauptkonduktor ist entweder doppelt oder so gebogen, dass derselbe der Scheibe an beiden Enden ihres horizontalen Durchmessers ganz nahe ist; derselbe ist mit 2 Reihen Spitzen versehen, welche denselben Zweck haben, wie die Spitzenreihe bei der Cylindermaschine. Eine gebräuchliche Form der Scheibenmaschine zeigt Fig. 24. Die Wirkungsweise der Maschine ist in allen Punkten von theoretischem Interesse dieselbe, wie bei der Cylindermaschine. Ihre Vorzüge bestehen darin, dass eine grosse Glasscheibe leichter hergestellt werden kann als ein grosser Glascylinder von vollkommener Gestalt; und dass die Entfernung auf der Oberfläche des Glases zwischen den aufsammelnden Spitzen und den Rändern der Reibzeuge bei der Glasscheibe grösser ist, als bei dem Cylinder, vorausgesetzt, dass man beide Male gleich grosse Flächen reibt, denn es sei noch bemerkt, dass, nachdem die beiden auf diese Weise getrennten Elektrizitäten bis zu einem gewissen Betrage angesammelt sind, eine Entladung längs dieser Oberfläche stattfindet, mithin deren Länge die Wirksamkeit der Maschine beschränkt. Bei einer neuern Konstruktion, welche wir Le Roy verdanken, und welche von Winter modifiziert wurde, hat man nur ein Reibzeug mit Lappen, die etwas mehr als einen Quadranten der Scheibe bedecken, und einen Kollektor mit doppelter Spitzenreihe. Bei der Winter'schen Maschine besteht der Hauptkonduktor aus einem ringförmigen Körper, welcher den Vorteil haben soll, grössere Elektrizitätsmengen anzusammeln, als der gebräuchlichere, walzenförmige Konduktor. Der Vorteil, den diese Form möglicher Weise gewährt, rührt wahrscheinlich von der Krüm-

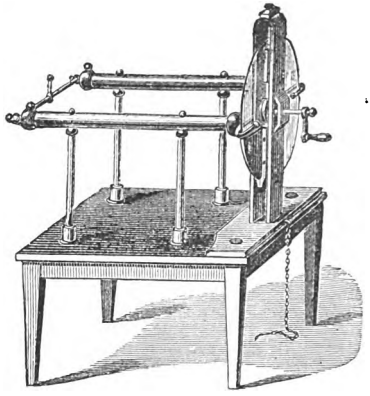

Fig. 24.

Digitized by Google

mung ihrer Oberfläche her, welche im Ganzen grösser ist, als bei der gebräuchlicheren Form.

41. Elektrisches Amalgam. Canton, welcher fand, dass Glas im hohen Grade elektrisiert wurde durch Eintauchen in trockenes Quecksilber, schlug vor, ein Amalgam von Zinn mit Quecksilber als geeigneten Ueberzug des Reibzeuges zu gebrauchen. Ein Amalgam von Zink wirkt ebenfalls gut; doch noch besser ist das Kienmayer'sche Amalgam, welches zu gleichen Teilen aus Zinn und Zink besteht, welche in geschmolzenem Zustande mit Quecksilber zusammengemengt werden (1 Teil Zinn, 1 Teil Zink, 2 Teile Quecksilber); Musivgold kann man ebenfalls gebrauchen. Diese Amalgame werden mit etwas steifem Fett auf die Kissen gestrichen. Sie haben den doppelten Zweck, die — Ladung wegzuleiten, welche während der Thätigkeit der Maschine auf dem Reibzeuge erzeugt wird, und als Reibzeug einen Stoff zu bieten, welcher noch mehr negativ (vergl. die Liste in Art. 5) ist, als das Leder oder die Seide des Kissens selbst. Gepulverter Graphit ist ebenfalls gut.

42. Vorsichtsmassregeln beim Gebrauche der Elektrisiermaschinen. Verschiedene Vorsichtsmassregeln sind beim Gebrauche der Elektrisiermaschinen zu beobachten. Feuchtigkeit und Staub muss man sorgfältig vermeiden. Die Oberfläche des Glases ist hygroskopisch, und man muss daher, abgesehen von sehr trockenen Klimaten, die Glasflächen und das Reibzeug erwärmen, um den angesammelten Feuchtigkeitsüberzug zu entfernen. Gläserne, zur Isolation bestimmte Stützen können mit einer dünnen Schicht von Schellack oder (festem) Paraffin überzogen werden. Ein Paar Tropfen wasserfreien Paraffins (welches man erhält, wenn man ein Stückchen Natrium in eine Flasche mit Paraffin-Oel thut), welche man mittelst eines Flanelllappens an die vorher erwärmten Flächen bringt, verhüten den Feuchtigkeitsniederschlag. Eine Elektrisiermaschine, welche mehrere Monate nicht gebraucht wurde, erfordert einen neuen Amalgambezug ihres Reibzeuges. Dasselbe sollte gereinigt und erwärmt werden; eine dünne gleich-

Digitized by Google

mässige Schicht von Talg oder anderm steifen Fett wird darüber gestrichen, und das Amalgam, welches vorher zu feinem Pulver zerstossen wurde, wird auf die Oberfläche gesiebt. Alle *Spitzen* sollte man bei Apparaten für Reibungselektrizität vermeiden, ausgenommen da, wo man sie besonders wünscht, wie z. B. die »saugenden« Spitzen am Hauptkonduktor, um eine elektrische Ladung abzuleiten. Alle Stäbe etc. bei Apparaten für Reibungselektrizität werden deshalb mit Knöpfen versehen, damit scharfe Kanten und Ecken vermieden werden.

43. Versuche mit der Elektrisiermaschine. Mit dem grossen Vorrat an Elektrizität, welchen die Elektrisiermaschine liefert, lassen sich viele hübsche und interessante Versuche anstellen. Die Erscheinungen der *Anziehung und Abstossung* können im grossen Maassstabe zur Anschauung gebracht werden. Fig. 25 stellt eine als **das elektrische Glockenspiel** bekannte Vorrichtung dar [1]), bei welchem 2 kleine, an seidenen Schnüren aufgehängte Metallkugeln in Bewegung gesetzt werden und gegen die Glocken anschlagen, zwischen denen sie aufgehängt sind. Die beiden äussern Glocken sind mittelst metallener Drähte oder Ketten an den Knopf der Maschine gehängt. Die dritte Glocke hängt an einem seidenen Faden, steht jedoch mit dem Erdboden durch eine Metallkette in Verbindung. Die Kugeln werden zuerst von den elektrisierten äussern Glocken angezogen, dann abgestossen, und nachdem sie sich an der nicht isolierten mittleren Glocke entladen haben, abermals angezogen, und auf diese Weise schwingen die Kugeln hin und her.

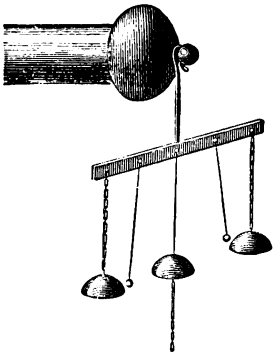

Fig. 25.

1) Erfunden im Jahre 1752 von Franklin, um ihn von dem Vorhandensein atmosphärischer Elektrizität zu benachrichtigen, welche ein zugespitzter eiserner Stab aus der Luft über seinem Hause aufsog.

Digitized by Google

Bei einer andern Vorrichtung lässt man kleine, aus Mark geschnittene Figuren oder Puppen auf- und niedertanzen zwischen einer Metallplatte, welche horizontal am Knopfe der Maschine aufgehängt ist, und einer andern platten Scheibe, welche sich einige Zentimeter tiefer befindet und mit der Erde in Verbindung steht.

Die *Wirkung von Spitzen*, Elektrizität von der Oberfläche eines Konduktors ausströmen zu lassen, kann man durch zahlreiche Versuche leicht beweisen. Ist die Maschine gut im Stande, und liefert sie 4 Zoll lange Funken, wenn man dem Knopfe den Knöchel nähert, so kann eine feine, zugespitzte Nadel, welche man am Konduktor anbringt, durch ihre Spitze die Elektrizität in so wirkungsvoller Weise entladen, dass man nur ganz kurze Funken aus dem Knopfe ziehen kann, während gleichzeitig ein feiner Strahl oder ein Büschel von blass blauem Lichte an der Nadelspitze erscheint. Hält man eine angezündete Kerze vor dieselbe, so wird die Flamme durch die Strömung der von der Spitze abgestossenen elektri-

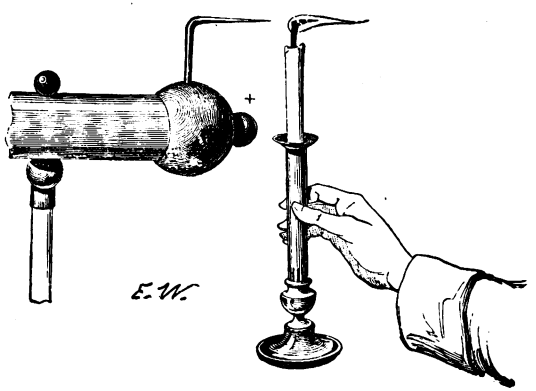

Fig. 26.

sierten Luft merklich zur Seite geblasen (Fig. 26). Diese Luftströmungen kann man mit der Hand fühlen. Sie rühren von einer gegenseitigen Abstossung der elektrisierten Luftteilchen

Digitized by Google

in der Nähe der Spitze und der auf der Spitze selbst angesammelten Elektrizität her. Diese *gegenseitige Abstossung* kann durch Hamilton's **elektrisches Flugrad** oder **elektrische Reaktionsmühle** (Fig. 27) nachgewiesen werden, dieselbe besteht aus einem leichten Kreuze aus Metall oder Stroh, welches auf einem vertikalen Stifte ruht und dessen zugespitzte Enden rechtwinklig umgebogen sind. Stellt man dasselbe auf den Hauptkonduktor oder verbindet es mit demselben durch eine Kette, so treibt die abstossende Kraft zwischen der Elektrizität der Spitzen und derjenigen der unmittelbar davor befindlichen Luft das Rad herum, und zwar in einer Richtung, welche derjenigen entgegengesetzt ist, nach welcher die Spitzen umgebogen sind.

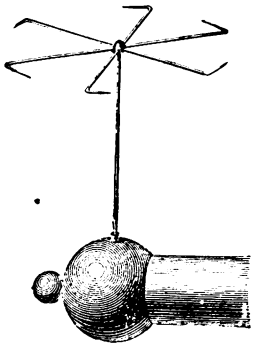

Fig. 27.

Eine andere beliebte Methode, die elektrische Abstossung zu zeigen, besteht darin, eine Puppe mit langen Haaren auf die Maschine zu stellen. Die einzelnen Haare stehen zu Berge, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird, indem sie vom Kopfe und von einander abgestossen werden. Aehnlich verhält es sich mit einem Papiertroddel, den man an den Hauptkonduktor hängt. Die überraschendste Art aber, diese Erscheinung zu zeigen, ist die, eine Person auf einen Schemel mit gläsernen Beinen treten und sie den Knopf der Maschine berühren zu lassen; wird die Maschine in Thätigkeit gesetzt, so stehen die Haare der Person zu Berge, falls dieselben trocken sind. Auch Funken springen ohne weiteres von einer auf diese Weise elektrisierten Person zu einer auf dem Erdboden Stehenden über.

Durch die Funken der Maschine kann man Weingeist oder Aether in einem metallenen Löffel anzünden, der durch einen Draht mit dem nächsten in die Erde führenden metallischen Leiter verbunden ist. Ausströmendes Gas kann dadurch entzündet werden, dass man vom Finger einer, wie eben beschrie-

Digitized by Google

ben, auf einem Isolierstuhle stehenden Person einen Funken nach dem Brenner überspringen lässt.

44. Armstrong's Dampf-Elektrisiermaschine. Die Reibung eines Dampfstrahles, welcher durch eine hölzerne Röhre aus dem Kessel strömt, erzeugt Elektrizität. In Wahrheit sind es die im Strahle verdichteten Wasserteilchen, welche diese Wirkung hervorbringen. W. Armstrong, welcher diese Quelle der Elektrizität untersuchte, konstruierte einen wirksamen Apparat, der unter dem Namen der **Dampf-Elektrisiermaschine** bekannt ist (Fig. 28). Dieselbe kann ausserordentlich grosse Mengen

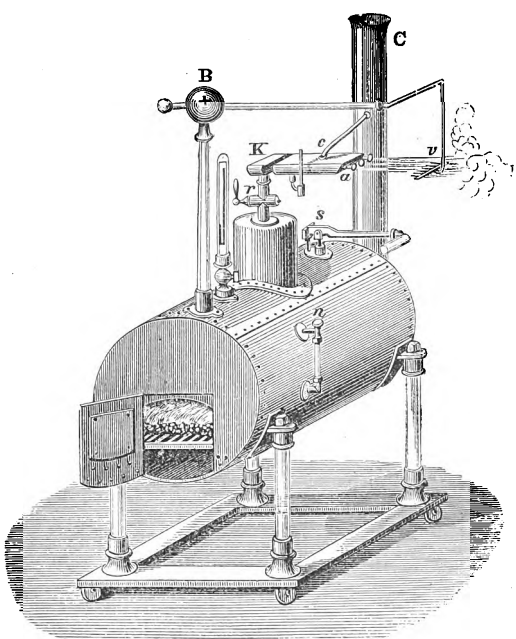

Fig. 28.

von Elektrizität erzeugen und Funken von fünf bis sechs Fuss Länge geben. Der Kollektor besteht aus einer Reihe Spitzen, welche von den aus den Röhren strömenden Dampfstrahlen getroffen und nebst einer als Hauptkonduktor dienenden Metall-

Digitized by Google

kugel von einer gläsernen Säule getragen werden. Die Röhren sind aus Holz, welches schief durchbohrt wurde, um die Reibung des Dampfstrahles an den Seiten noch zu vermehren.

41. Influenz-Elektrisier-Maschinen. Es gibt noch eine andre Klasse von Elektrisiermaschinen, welche sich gänzlich von den bisher beschriebenen unterscheiden und auf der Verwendung einer kleinen Anfangsladung beruhen, welche durch *Induktion* (Influenz) andere Ladungen erzeugt, die dann durch die beweglichen Teile der Maschine an eine andere Stelle *geführt* werden, wo sie die Anfangsladung vermehren oder einem geeigneten Kollektor eine Zufuhr an Elektrizität mitteilen können. Unter diesen Apparaten ist der älteste Volta's **Elektrophor**, welcher in der 3. Vorlesung zur Genüge erklärt wurde. Bennet, Nicholson, Darwin und Andere erfanden Apparate, um durch Mechanismus das zu verrichten, was beim Elektrophor die Hand thut. Nicholson's Umdrehungs-Verdoppler ist ein rotierender Apparat, bei welchem eine isolierte Verteilungswalze in die Nähe eines elektrisierten Körpers gebracht werden kann, dort einen Augenblick zur Berührung gelangt, um ihre abgestossene Elektrizität zu verlieren, und dann mit ihrer aufgenommenen Ladung zu einem andern Körper geführt wird, dem sie ihre Ladung mitteilt, und welcher seinerseits induzierend auf sie wirkt und ihr eine entgegengesetzte Ladung mitteilt, welche die Verteilungswalze dann nach dem ersten Körper wieder überführt, und so dessen ursprüngliche Ladung bei jeder Rotation vermehrt. Aehnliche Apparate haben Varley, W. Thompson, Töpler, Carré und Holtz erfunden. Die Apparate der beiden letzt Genannten sind in ihrer Wirkung vollkommen kontinuierlich und sind als *kontinuierliche Elektrophore* ausführlich beschrieben worden. Die Maschine von Holtz hat eine so allgemeine Anwendung gefunden, dass ihre Beschreibung hier am Platze ist.

46. Influenz-Maschine von Holtz. Die Wirkung dieser Maschine ist nicht ganz leicht zu verstehen, obschon in Wirklichkeit bei sorgfältiger Erklärung dieselbe ziemlich einfach ist.

Digitized by Google

In ihrer neuesten Gestalt besteht die Maschine (Fig. 29) aus zwei Scheiben, von denen die eine, A, an ihrem Rande befestigt ist, während die andere, B, welche um eine Achse drehbar ist, mittelst einer Schnur und eines Treibrades in schnelle Rotation versetzt werden kann. An der festen Scheibe sind an zwei entgegengesetzten Stellen 2 Oeffnungen oder Fenster, P und P', angebracht. Zwei gefirnisste Papierstreifen, *f* und *f'*, sind auf die Scheibe geklebt, und zwar oberhalb des linken und unterhalb des rechten Fensters. Diese Papierstreifen oder *Armaturen* befinden sich auf derjenigen Seite der festen Scheibe, welche der beweglichen Platte abgekehrt ist, oder, wie wir sagen können, auf der Rückseite der festen Scheibe. Die Armaturen sind mit schmalen Ansatzstreifen versehen, welche durch die Fenster hindurch bis an die bewegliche Scheibe reichen, die sie mit ihren vordersten Spitzen beinahe berühren. Die Scheibe muss in der entgegengesetzten Richtung rotieren, als die ist, nach welcher diese Ansatzstreifen zeigen. Auf der vorderen Seite der beweglichen Scheibe, den obern Rändern der beiden Armaturen gegenüber, befindet sich ein schräg stehender Metallkonduktor D, welcher nicht isoliert zu werden braucht. Derselbe ist mit Metall-*Kämmen* oder Spitzen versehen, welche nach der Scheibe gerichtet sind. Zur Rechten und Linken befinden sich 2, von isolierenden Stützen getragene, horizontale Metallkämme, welche mit 2 in Messingkugeln *m* und *n* endigenden Metallstäben verbunden sind. Letztere bilden bei dieser Form der Maschine nur einen Entladungsapparat und kommen bei der Wirkung der Maschine nicht in Betracht. Bei einigen Arten der Maschine von Holtz hat man keinen Diagonal-Kon-

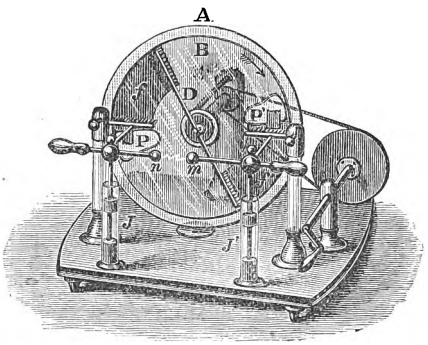

Fig. 29.

Digitized by Google

duktor D, und da der Entladungsapparat dann beide Funktionen zu verrichten hat, so müssen die Kugeln *m* und *n* bei dieser Konstruktion der Maschine sich berühren, bevor die Maschine sich ladet. Um mit der Maschine zu arbeiten, muss man einer der beiden Armaturen mittelst eines Elektrophors oder eines geriebenen Glasstabes eine kleine Anfangsladung mitteilen. Die Scheibe wird dann in schnelle Rotation versetzt; nach einigen Umdrehungen findet man, dass der Arbeitsaufwand, welcher zur Unterhaltung der Rotation erforderlich ist, bedeutend zunimmt; gleichzeitig sieht man Büschel blassblauen Lichtes den Spitzen entströmen, und wenn man die Messingkugeln von einander trennt, so springen glänzende Funken in schneller Folge durch den Zwischenraum. Die Maschine wirkt in folgender Weise: Angenommen, wir hätten von anfang an der rechten Armatur f' eine kleine $+$ Ladung mitgeteilt; diese Ladung wirkt induzierend durch das dazwischen befindliche Glas und die Luft auf den Kamm am untern Ende des Diagonal-Konduktors D, stösst die $(+)$ Elektrizität durch D hindurch ab, und lässt die untern Spitzen negativ geladen. Diese strömen negativ elektrisierte Luft auf die vordere Seite der beweglichen Scheibe aus, während die abgestossene $+$ Ladung längs D in die Höhe steigt und durch den obern Kamm auf die Vorderseite der beweglichen Scheibe entladen wird. Hier wirkt dieselbe induzierend auf die Papierarmatur f und bewirkt an der dem Kamme gegenüber befindlichen Stelle eine $-$ Ladung, während sie eine $+$ Ladung so weit wie möglich abstösst, nämlich bis in den Ansatzstreifen, welcher langsam eine $+$ Ladung auf die Rückseite der beweglichen Scheibe entladet. Wenn jetzt die Scheibe gedreht wird, so gelangt diese auf der Rückseite befindliche $+$ Ladung in der durch den Pfeil angezeigten Richtung von links nach rechts und wenn dieselbe sich dem rechten Ansatzstreifen gegenüber befindet, so entladet sie sich in die Armatur f', deren Ladung sie verstärkt und so dazu beiträgt, dass jene Armatur noch stärker als zuvor wirkt. Unterdes hat die $-$ Ladung, welche, wie wir sahen, in der linken

Digitized by Google

Armatur *f* induziert worden war, ihrerseits auf den obern Kamm gewirkt und denselben veranlasst, in stärkerm Massstabe als vorher eine + Ladung aus seinen Spitzen ausströmen zu lassen und durch den Diagonalstab Elektrizität anzuziehen. Die Kämme an den beiden Enden dieses Stabes strömen daher beide elektrische Luftströme aus; der obere ladet den obern Teil der Vorderseite der rotierenden Scheibe positiv, der untere ladet den untern Teil der Scheibe negativ. Die Rückseite der rotierenden Scheibe wird gleichzeitig auf ähnliche Weise geladen; und die auf der Rückseite befindlichen Ladungen dienen, sobald die Scheibe gedreht wird, dazu, die Ladungen der beiden Armaturen zu verstärken. Auf diese Weise wird eine sehr kleine Anfangsladung bald auf ein Maximum gebracht, dessen Grenze erreicht ist, wenn die Elektrizität der Armaturen so bedeutend geworden ist, dass das Entweichen der Elektrizität an ihrer Oberfläche ebenso gross ist, wie der Gewinn durch Induktion und Ueberführung. Die von den Spitzen des Diagonal-Konduktors auf die Vorderseite der beweglichen Scheibe ausgeströmten Ladungen werden mit der Scheibe im Kreise bewegt und in den rechten und linken Konduktor des Entladungsapparates entladen, vermittelst der horizontalen Kämme, welche die Ladungen genau auf dieselbe Weise ansammeln, wie im Art. 39 auseinander gesetzt wurde. Zwei kleine Leydener Flaschen werden meist verwendet, um die Dichte der zwischen *m* und *n* überspringenden Funken noch zu vergrössern.

Bei einigen neuern Konstruktionen der Maschine von Holtz wendet man mehrere an einer gemeinschaftlichen Achse befestigte, rotierende Scheiben an, und umgibt das Ganze mit einem Glaskasten, um den Zutritt von Feuchtigkeit zu verhindern. Eine kleine Scheibe von Ebonit wird jetzt gewöhnlich an der Achse befestigt und mit einem Reibzeuge versehen, um die Anfangsladung zu unterhalten. Holtz hat kürzlich eine Maschine mit 32 Scheiben konstruiert.

Mascart hat die interessante Thatsache nachgewiesen, dass die Maschine von Holtz in ihrer Wirkung *umkehrbar* ist, d. h. wenn eine kontinuierliche

Digitized by Google

Zufuhr beider Elektrizitäten (von einer andern Maschine geliefert) den Armaturen zugeführt wird, so wird die bewegliche Scheibe dadurch in Rotation versetzt, und dreht sich im entgegengesetzten Sinne.

Righi hat gezeigt, dass eine Maschine von Holtz einen kontinuierlichen Strom liefern kann, wie eine Volta'sche Batterie, wobei die Stromstärke der Umdrehungsgeschwindigkeit nahezu proportional ist. Man fand, dass die elektromotorische Kraft einer Maschine bei jeder beliebigen Umdrehungsgeschwindigkeit gleich der von 52,000 Daniell'schen Elementen war, oder nahezu 53,000 Volt. Wenn die Maschine 120 Umdrehungen in der Minute machte, so war der Widerstand gleich 2180 Millionen Ohm; bei 450 Umdrehungen in der Minute jedoch nur 646 Millionen Ohm.

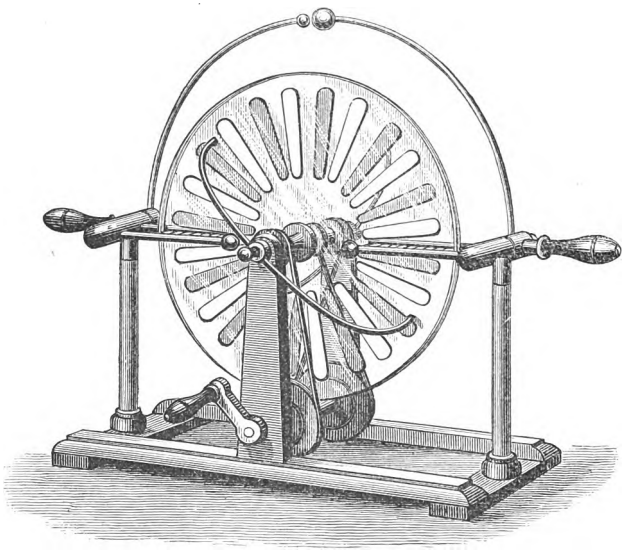

Fig. 29a.

Voss hat kürzlich eine einfache, der an Fig. 29 beschriebenen sehr ähnliche Maschine konstruiert, aber nach Töpler's Plan, indem er kleine Metallknöpfe an der Vorderseite der rotierenden Scheibe anbrachte, welche während der Rotation von kleinen, an den Kämmen befestigten Metallbürsten lose berührt wurden und auf diese Weise durch die Reibung eine kleine Anfangsladung besorgten. Bei dieser Maschine finden sich keine Fenster, sondern es werden kleine Metallarme, welche an den Papierarmaturen befestigt und mit kleinen Bürsten von Metallfolie versehen sind, im Bogen nach der Vorderseite der rotierenden Scheibe geführt, so dass sie die Knöpfe bei

Digitized by Google

ihrem Durchgange berühren. Die Knöpfe wirken daher als Träger derjenigen Ladungen, welche in ihnen dadurch hervorgerufen werden, dass sie während sie unter dem Einflusse induzierender Kräfte stehen, berührt werden.

46a. Influenz-Maschine von Wimshurst. Noch jüngern Datums ist die Maschine von Wimshurst (Fig. 29a), bei welcher die beiden Scheiben in entgegengesetzten Richtungen rotieren. Jede Scheibe ist mit einer Reihe schmaler Streifen von dünner Metall-Folie belegt, welche sowohl als Leiter, sowie als Armaturen dienen. Ferner hat die Maschine 2 nicht isolierte Diagonal-Konduktoren an der Vorder- und Hinterseite, und 2 isolierte Saug-Kämme zur Rechten und Linken, welche mit einem Entladungsapparate verbunden sind. Jeder kleine Leiter wird von einer nicht isolierten Bürste berührt, sobald er an einem ihm gegenüberbefindlichen, geladenen Leiter der andern Scheibe vorbeikommt, und dadurch wird in jedem eine Ladung induziert, die er zu den rechts und links befindlichen Saugkämmen überführt.

VI. VORLESUNG: *Die Leydener Flasche und andre Kondensatoren.*

47. In den vorhergehenden Vorlesungen wurde nachgewiesen, dass entgegengesetzte elektrische Ladungen einander anziehen; dass die Elektrizität nicht durch Glas hindurchströmen kann, dass sie jedoch *durch Glas hindurch* induzierend wirken kann. Zwei aufgehängte Hollundermarkkugeln, von denen die eine +, die andre — elektrisch ist, ziehen sich gegenseitig an durch die dazwischen befindliche Luft, auch wenn eine Glasscheibe zwischen sie gehalten wird, obgleich weder sie selbst, noch die elektrischen Ladungen auf ihnen durch das Glas hindurch können. Wenn man eine negativ elektrisierte Hollundermarkkugel in das Innere einer trockenen Glasflasche hängt, und ausserhalb einen geriebenen Glasstab hält, so bewegt sich die Hollundermarkkugel nach der dem Glasstabe nächsten Seite der Flasche, da sie von der ihr so

Digitized by Google

genäherten + Ladung angezogen wird. Befestigt man mitten auf jeder Seite einer Glasscheibe ein Stück Zinnfolie und ladet das eine Stück +, das andre —, so ziehen sich beide Ladungen durch das Glas hindurch an, und sind dann nicht mehr frei. Stellt man die Scheibe aufrecht, so dass die Stücke von Zinnfolie den Tisch nicht berühren, so ergibt sich, dass man durch blosses Berühren der Zinnfolie kaum irgend welche Elektrizität erhalten kann, denn die Ladungen sind durch ihre gegenseitige Anziehung **gebunden**; jede Ladung wirkt induzierend auf die andre. Es stellt sich in der That heraus, dass diese beiden Stücke Zinnfolie auf diese Weise bei weitem stärker geladen werden können, als es der Fall sein würde, wenn jedes allein auf ein Stück Glas geklebt und dann elektrisiert würde. Mit andern Worten: *Die Kapazität eines Konduktors wird beträchtlich vergrössert, wenn derselbe in die Nähe eines mit der entgegengesetzten Elektrizität geladenen Konduktors gebracht wird.* Wenn seine Kapazität erhöht wird, so kann man demselben ein grösseres Quantum Elektrizität mitteilen, ehe er auf ein hohes Potential gebracht wird. Deshalb kann man einen solchen Apparat, der dazu bestimmt ist, ein grosses Quantum Elektrizität zu fassen, einen **Kondensator** oder **Akkumulator** der Elektrizität nennen.

48. Kondensatoren. Angenommen nun, wir hätten 2 an isolierenden Stützen befestigte Metallscheiben A und B (Fig. 30) und zwischen ihnen eine Glasscheibe. B sei durch einen Draht mit dem Knopfe einer Elektrisiermaschine verbunden und A ebenfalls durch einen Draht mit der Erde. Die + Ladung auf B wirkt durch die Glasscheibe hindurch induzierend auf A, stösst die + Elektrizität zur Erde ab und lässt eine — Ladung auf der nächsten Seite von A zurück. Diese — Ladung auf A zieht die + Ladung von B auf die dem Glase zu-

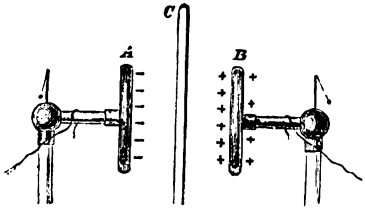

Fig. 30.

Digitized by Google

gekehrte Seite hin, und eine neue Zufuhr an Elektrizität kommt von der Maschine. Auf diese Weise wird dieser Apparat ein Akkumulator oder Kondensator. Werden die beiden Metallscheiben dicht an die Glasscheibe gerückt, so findet eine um so stärkere Anziehung zwischen der + und — Ladung statt, weil sie sich dann näher sind und die induzierende Kraft grösser ist; deshalb kann ein noch grösseres Quantum in den Metallscheiben angehäuft werden. Daraus erkennen wir, dass die Kapazität eines Akkumulators erhöht wird, wenn man die Scheiben nahe zusammenbringt. Wenn man dann, während die Scheiben stark geladen sind, die Drähte entfernt und die Scheiben auseinander rückt, so halten sich die beiden Ladungen nicht mehr so fest gebunden, und es befindet sich an ihren Oberflächen mehr *freie* Elektrizität als vorher. Dies erkennt der Experimentierende an den kleinen Hollundermarkkugeln-Elektroskopen, welche an ihnen befestigt sind (man sehe die Figur), und welche aus einander fliegen, sobald man die Metallplatten von einander entfernt. Wir haben der Scheibe B keine weitere Ladung mitgeteilt und doch sollten wir aus dem Verhalten der Elektroskope schliessen, dass sie durch ihre Entfernung von der Scheibe A stärker elektrisiert worden wäre. Die Sache ist die, dass die *Kapazität* von B beträchtlich erhöht wurde, so lange der Konduktor B sich in der Nähe der — Ladung von A befand, dass aber die Kapazität von B abnahm, als B von A entfernt wurde, und deshalb wird jetzt B durch dasselbe Quantum Elektrizität stärker elektrisiert als vorher. Eine mit der Erde verbundene Platte in der Nähe eines isolierten Konduktors erhöht daher seine Kapazität und gestattet demselben eine grössere Ladung in sich anzuhäufen durch Anziehung und *Verdichtung* der Elektrizität auf der der Erdplatte zugekehrten Seite, so dass die Oberflächen-Dichte auf dieser Seite also sehr gross ist. Ein solcher Apparat heisst bald ein **Kondensator,** bald ein **Akkumulator.** Wir wollen den Apparat Kondensator nennen, wenn die mit der Erde verbundene Platte dazu dient, die Flächendichte der Ladung auf einer Seite des

Digitized by Google

isolierten Konduktors zu erhöhen. Der Ausdruck Akkumulator wird jetzt oft auf Batterieen angewendet, welche die Energie elektrischer Ströme ansammeln (Art. 415).

Eine *Luftschicht* zwischen den beiden Scheiben genügt auch schon, um die beiden Ladungen von einander zu isolieren. Die auf diese Weise durch eine Luftschicht getrennten Metallscheiben bilden einen **Luftkondensator.** Solche Kondensatoren wurden zuerst von Wilke und Aepinus konstruiert.

49. Dielektrische Körper. Bei den vorhergehenden Versuchen spielen die Glasplatte oder die Luftschicht eine wichtige Rolle, indem sie den elektrischen Induktionskräften durch sie hindurchzuwirken gestatten. Wegen dieser Eigenschaft nannte Faraday diese Körper **dielektrisch.** Alle dielektrischen Körper sind Isolatoren, aber Körper, die gleich gute Isolatoren sind, sind darum noch nicht notwendig auch gleich gute dielektrische Körper. Luft und Glas sind bei weitem bessere Isolatoren als Ebonit oder Paraffin, insofern als sie viel schlechtere Leiter sind. Doch ist die Induktion durch eine Glasplatte stärker, als durch eine gleich dicke Platte von Ebonit oder Paraffin, und durch diese wieder stärker, als durch eine Luftschicht. Mit andern Worten: Glas ist ein besserer **dielektrischer** Körper, als Ebonit oder Paraffin oder Luft. Von denjenigen Körpern, welche stark dielektrisch sind, sagt man, sie besitzen eine hohe *induktive Kapazität.*

50. Kapazität eines Kondensators. Hieraus geht hervor, dass die Kapazität eines Kondensators abhängt:

1) Von der Grösse und Gestalt der Metallplatten oder Metallbelege,
2) von der Dicke der dielektrischen Schicht zwischen ihnen, und
3) von der induktiven Kapazität des dielektrischen Körpers.

51. Die Leydener Flasche. Die Leydener Flasche, so genannt nach der Stadt, wo sie erfunden wurde, ist eine bequeme Form eines Kondensators. Sie besteht gewöhnlich aus

Digitized by Google

einer Glasflasche (Fig. 31), welche auf der innern wie äussern Seite bis zu einer bestimmten Höhe mit Zinnfolie überzogen ist. Ein starker Metalldraht, welcher an seinem obern Ende einen Metallknopf trägt, führt durch einen Deckel aus trockenem, gut gefirnisstem Holze in das Innere des Gefässes und steht durch eine kleine, schlaffe Metallkette mit der innern Metallbelegung in Verbindung. Um die Flasche zu laden, hält man den Knopf an den Hauptkonduktor einer Elektrisiermaschine, indem man dabei die äussere Belegung entweder mit der Hand anfasst oder durch einen Draht oder eine Kette mit der Erde verbindet. Wenn auf diese Weise der innern Belegung eine + Ladung mitgeteilt wird, so wirkt dieselbe induzierend auf die äussere Belegung, zieht eine — Ladung auf die das Glas berührende Seite der äussern Belegung, und stösst eine + Ladung auf die Aussenseite der äussern Belegung ab, und von dort durch die Hand oder den Draht in die Erde. Nach kurzer Zeit hat die Flasche ihre volle Ladung erhalten, indem die äussere Belegung —, die innere + geladen ist. Wenn die Flasche aus gutem Glase angefertigt ist und trocken und staubfrei, so behält sie ihre Ladung Stunden, ja Tage lang. Wenn jedoch ein Weg vorhanden ist, auf welchem die sich gegenseitig anziehenden Elektrizitäten sich vereinigen können, so thun sie dies, und die Flasche entladet sich dann augenblicklich. Wenn man die äussere Belegung mit der einen Hand anfasst und den Knöchel der andern dem Knopfe der Flasche nähert, so springt ein heller Funke vom Knopfe auf den Knöchel mit lautem Knall über und die Muskeln der Handgelenke, Ellbogen und Schultern spüren in demselben Augenblicke einen krampfhaften Schlag. Ein sichereres Mittel, die Flasche zu entladen, bietet die **Entladungszange** oder der **Auslader** (Fig. 32), welcher aus einem mit Scharnier versehenen Metallstabe besteht, an dem Metallknöpfe und ein gläserner

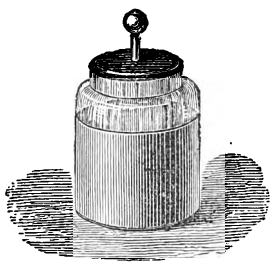

Fig. 31.

Digitized by Google

Handgriff angebracht sind. Den einen Knopf hält man gegen die äussere Belegung, während der andre dann dem Knopfe der Flasche genähert wird. Ein heller, schallender Funke, der von Knopf zu Knopf springt, zeigt an, dass die beiden angehäuften Elektrizitäten sich vereinigt und dadurch die Entladung bewirkt haben.

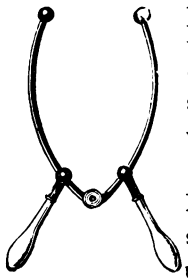

Fig. 32.

52. Entdeckung der Leydener Flasche. Die Entdeckung der Leydener Flasche schreibt sich her von dem Versuche Musschenbroek's und seines Schülers Cuneus [1]), welche das sogenannte elektrische Fluidum in einer halb mit Wasser gefüllten Flasche sammeln wollten, die in der Hand gehalten wurde und mit einem Nagel versehen war, welcher das Fluidum von der Elektrisiermaschine durch den Kork zu dem Wasser leiten sollte. Hier diente das Wasser als innere und die Hand als äussere Belegung der Flasche. Als Cuneus den Nagel berührte, erhielt er einen Schlag. Diese zufällige Entdeckung erregte in Europa und Amerika die grösste Bewunderung.

53. Das Residuum oder der elektrische Rückstand. Wenn eine Leydener Flasche geladen und entladen wird, und dann eine Zeit lang sich selbst überlassen bleibt, so ergibt sich, dass man beim abermaligen Entladen einen zweiten kleinen Funken bekommt. Es existiert in der That eine **zurückgebliebene Ladung** (Residuum), welche von dem Glase aufgesaugt oder absorbiert zu sein scheint. Die Wiederkehr des Residuums wird beschleunigt, wenn man die Flasche ab und zu berührt. Die Menge des Residuums ist verschieden je nach der Zeit, die nach der Entladung der Flasche verstrichen ist; hängt auch von der Glassorte ab, aus welcher die Flasche verfertigt ist. In einem Luftkondensator kann man, wenn derselbe einmal entladen ist, kein Residuum entdecken.

---

1) Die Ehre der Entdeckung wird auch für den Prälaten Kleist von Camin in Anspruch genommen.

Digitized by Google

54. Batterieen von Leydener Flaschen. Eine grosse Leydener Flasche gibt einen stärkern Schlag, als eine kleine, denn sie kann eine grössere Ladung aufnehmen; ihre Kapazität ist grösser. Eine aus *dünnem* Glase verfertigte Leydener Flasche hat als Akkumultator eine grössere Kapazität als eine dicke Flasche von gleicher Grösse. Ist jedoch das Glas zu dünn, so wird die Flasche, wenn sie zu stark geladen wird, durch einen das Glas wirklich durchbohrenden Funken unbrauchbar. Gehärtetes Glas wird weniger leicht durchbrochen als gewöhnliches Glas, und deshalb können Leydener Flaschen, welche aus jenem gefertigt sind, entsprechend dünner sein und trotzdem eine grössere Ladung aushalten.

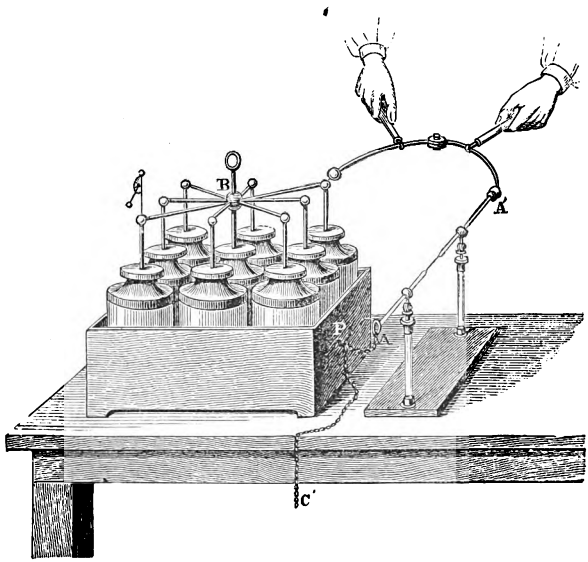

Fig. 33.

Wenn man jedoch eine sehr grosse elektrische Ladung anzuhäufen wünscht, so muss man mehrere Flaschen benutzen, und alle ihre innern Belegungen mit einander verbinden, und ebenso alle ihre äussern. Diese Anordnung heisst eine **Batterie von Leydener Flaschen** oder eine Leydener Batterie (Fig. 33). Da die-

Digitized by Google

selbe eine grosse Kapazität hat, so ist eine grosse Elektrizitätsmenge erforderlich, um sie völlig zu laden. Geladen kann sie dann sehr kräftige Wirkungen hervorbringen; ihr Funken durchbohrt Glas ohne Weiteres, und man muss sich sehr in acht nehmen, dass der vom Funken herrührende Schlag nicht durch den Körper hindurchgeht, da derselbe tödtlich sein könnte. Den Universal-Auslader, wie er bei der Leydener Batterie zur Anwendung kommt, zeigt die Figur.

55. Sitz der Ladung. Benjamin Franklin entdeckte, dass die Ladungen der Leydener Flasche in Wirklichkeit an der Oberfläche des Glases und nicht an den Metallbelegungen hafteten. Dies bewies er mittelst einer Flasche, deren Belegungen weggenommen werden konnten, Fig. 34. Die Flasche wurde geladen und auf eine isolierende Unterlage gestellt. Die innere Belegung wurde dann in die Höhe gehoben und die Glasflasche aus der äussern Belegung herausgenommen. Doch keine Belegung war irgendwie elektrisch. Als die Flasche jedoch wieder zusammengesetzt wurde, war sie wieder stark geladen. Die Ladungen waren während der ganzen Zeit auf der innern und äussern Fläche des dielektrischen Glases geblieben.

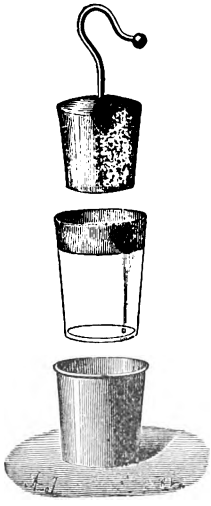

Fig. 34.

56. Dielektrische Spannung. Faraday bewies, dass das Medium, durch welches die Induktion stattfindet, in Wirklichkeit eine wichtige Rolle bei der Erscheinung spielt. Man weiss jetzt, dass alle dielektrischen Körper, durch welche Induktionskräfte wirken, dadurch *gespannt* werden [1]). Da ein gut luftleer gemachter Raum ein

1) In den exakten Wissenschaften bedeutet eine Spannung eine Veränderung der Gestalt oder des Volumens, herrührend von der Einwirkung eines *Stress*. Ein *Stress* ist die Kraft, der Druck oder irgend ein anderes Agens, welches eine Spannung erzeugt.

Digitized by Google

guter dielektrischer Körper ist, ist es klar, dass nicht notwendig die materiellen Moleküle des dielektrischen Körpers es sind, auf welche so eingewirkt wird; deshalb nimmt man an, dass die elektrischen Erscheinungen von den Druck- und Zugkräften und den Spannungen in dem sogenannten **Aether** herrühren, einem dünnen, feinen Medium, welches den ganzen Raum und alle Dinge durchdringt, und dessen höchst elastische Natur es befähigt, die Lichtschwingungen zu uns zu tragen, obgleich es viele Millionen mal dünner ist als die Luft. Da die Moleküle der Körper innig vom Aether umgeben sind, so teilen sich die Spannungen des Aethers auch den Molekülen der Körper mit, so dass auch diese eine Spannung erleiden. Das Glas zwischen den beiden Metallbelegungen bei der Leydener Flasche wird in der That zwischen den sich anziehenden elektrischen Ladungen gespannt oder gedrückt. Wenn eine isolierte, geladene Kugel in einem Zimmer aufgehängt wird, so wird eine ebenso grosse Menge der entgegengesetzten Elektrizität auf die innere Seite der Zimmerwände gezogen und die Luft zwischen der Kugel und den Wänden wird (elektrisch) **gespannt**, wie das Glas der Leydener Flasche. Wenn eine Leydener Flasche aus dünnem Glase angefertigt wird, so kommt es vor, dass sie unter der spannenden Kraft nachgibt; und wenn eine Leydener Flasche entladen wird, so wird die Luftschicht zwischen dem Knopfe der Flasche und dem Knopfe des Ausladers um so mehr gespannt, je mehr dieselben sich einander nähern, bis zuletzt die spannende Kraft zu gross wird, so dass die Luftschicht nachgibt und von dem Funken, welcher sich durch sie entladet, durchbrochen wird. Das Vorhandensein solcher spannenden Kräfte gibt uns eine Erklärung für die Residua der Leydener Flaschen, bei denen das Glas in Folge seiner Zähigkeit sich nicht einmal von der Spannung, der es unterworfen war, erholt. Diese Hypothese, dass die **elektrische Kraft durch den Raum hindurch wirkt in Folge von Uebertragung der spannenden Kräfte in dem den Raum erfüllenden Medium**, hat jetzt die alte Theorie von der Fernwirkung, welche logisch undenkbar war, und über-

Digitized by Google

dies die Thatsachen der Beobachtung nicht zu erklären vermochte, vollständig verdrängt.

VII. VORLESUNG: *Weitere Quellen der Elektrizität.*

57. Zu Schluss der ersten Vorlesung (Art. 10) bemerkten wir, dass **Reibung** keineswegs die einzige Quelle der Elektrizität ist. Wir wollen jetzt einige weitere Quellen aufführen.

58. Stoss. Ein heftiger Stoss zweier verschiedener Körper gegen einander erzeugt auf ihren Oberflächen Elektrizitäten entgegengesetzter Art. Man kann in der That eine Tabelle entwerfen, ähnlich der des Art. 5, in der Reihenfolge, dass jeder Körper, der von einem andern, weiter unten auf der Tabelle befindlichen gestossen wird, eine + Ladung erhält. Erman, der eine solche Tabelle für eine Anzahl von Metallen entwarf, fand, dass die Reihenfolge dieselbe war, wie die der thermo-elektrischen Reihe, welche in Art. 381 angegeben ist.

59. Vibration. Volpicelli zeigte, dass Schwingungen, die in einem mit Schwefel oder einer andern isolierenden Substanz überzogenen Metallstabe erregt wurden, eine Scheidung der Elektrizitäten an der Trennungsfläche des Metalls von dem Nichtleiter erzeugten.

60. Bruch und Spaltung. Wenn ein Kartenblatt im Dunkeln zerrissen wird, so bemerkt man Funken, und wenn man die getrennten Teile mit einem Elektroskop prüft, so findet man, dass dieselben elektrisch sind. Die mit Papier überzogene Leinwand, welche man zur Anfertigung von Papierkragen und starken Enveloppen gebraucht, zeigt dies recht deutlich. Wenn man im Dunkeln ein Stück Zucker mit den Zähnen zerbeisst, so bemerkt man bleiche Lichtflammen. Die plötzliche Spaltung einer Tafel von Glimmer bringt ebenfalls Funken hervor, und beide Platten zeigen sich elektrisch.

61. Krystallisation und Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand. Viele Körper erweisen sich elektrisch, wenn sie aus dem flüssigen in den festen Zustand

Digitized by Google

übergehen. Giesst man Schwefel auf eine Glasschale und lässt denselben erkalten, so wird derselbe stark elektrisch, was man erkennen kann, wenn man die krystallinische Masse mit einem Glasstabe aushebt. Chokolade wird ebenfalls beim Festwerden elektrisch. Wenn Arseniksäure aus einer Lösung in Chlorwasserstoffsäure heraus krystallisiert, so ist die Bildung beider Krystalle von einem Lichtblitz begleitet, der ohne Zweifel von einer elektrischen Entladung herrührt. Eine merkwürdige Erscheinung hat man, wenn man Kupfervitriol und Kalium in einen Schmelztiegel giesst. Es wird fest, ohne elektrisch zu werden; wenn es sich dann aber etwas abkühlt, so zerspringt die krystallinische Masse in Stücke unter augenblicklicher Elektrizitätsentwicklung.

62. Verbrennung. Volta zeigte, dass Verbrennung Elektrizität erzeugt. Ein Stück brennende Holzkohle oder eine brennende Räucherkerze, wie sie zur Räucherung gebraucht wird, bringt die Blätter eines Goldblattelektroskopes, mit dessen Knopfe sie verbunden ist, zum Divergieren.

63. Verdampfen. Das Verdampfen von Flüssigkeiten ist häufig mit Elektrizitätserregungen verbunden, wobei die Flüssigkeit und der Dampf sich mit entgegengesetzten Elektrizitäten laden. Einige Tropfen einer Kupfervitriollösung, in einen heissen Schmelztiegel aus Platina gegossen, erzeugen bei ihrer Verdampfung eine starke Elektrizitätserregung.

64. Atmosphärische Elektrizität. In engem Zusammenhange mit der durch Verdampfung erzeugten Elektrizität steht die atmosphärische Elektrizität, welche sich stets in der Luft vorfindet, und welche, zum Teil wenigstens, von der über dem Meere stattfindenden Verdunstung herrührt. Die atmosphärische Elektrizität ist in der 24. Vorlesung besonders behandelt.

65. Druck. Eine grosse Zahl von Körpern werden, wenn sie zusammengedrückt werden, auf ihrer Oberfläche elektrisch. Kork z. B. wird + elektrisch, wenn man ihn gegen Bernstein, Guttapercha oder Metalle drückt; dagegen — elektrisch, wenn

Digitized by Google

man ihn gegen Spath oder animalische Körper drückt. Der Abt Haüy fand, dass ein Krystall von Kalkspath, zwischen den trockenen Fingern längs der stumpfen Kanten gedrückt, elektrisch wurde und dass er seine Elektrizität mehrere Tage lang behielt. Er machte auch den Vorschlag, einen gepressten, aufgehängten Krystall als Elektroskop zu gebrauchen. Eine ähnliche Eigenschaft schreibt man dem Glimmer, Topas und Flussspath zu. Durch Druck werden auch entgegengesetzte Elektrizitäten an den entgegengesetzten Enden eines Krystalls von Turmalin erzeugt, sowie auch bei andern im nächsten § erwähnten Krystallen.

66. Pyro-Elektrizität. Es gibt gewisse Krystalle, welche an bestimmten Stellen oder Polen elektrische Ladungen aufweisen, wenn sie erhitzt oder abgekühlt werden. Krystalle, die durch Erhitzung oder Abkühlung elektrisch werden, nennt man **pyro-elektrisch.** Der hauptsächlichste von ihnen ist der **Turmalin,** dessen Eigenschaft, nach der Erhitzung leichte Körper an seinen Enden anzuziehen, schon Jahrhunderte lang bekannt war. Derselbe wird von Theophrast und Plinius unter dem Namen *Lapis Lyncurius* erwähnt. Der Turmalin ist ein hartes Mineral, und in dünnen Platten durchscheinend, von dunkelgrüner oder brauner Farbe, im natürlichen Zustande jedoch vollkommen schwarz und undurchsichtig; derselbe hat die Eigenschaft, das Licht zu polarisieren. Man findet ihn für gewöhnlich in etwas unregelmässigen dreiseitigen Prismen, welche im vollkommenen Zustande an beiden Enden zugespitzt sind. Er gehört zu dem Hexagonal-System, ist jedoch bloss hemiedrisch, d. h. die Seiten sind nur abwechselnd entwickelt. Seine Gestalt ist in Fig. 35 abgebildet, wo man neben einer vollständigen Ansicht noch die beiden Enden A und B besonders dargestellt sieht. Man wird bemerken, dass diese beiden Enden etwas von einander verschieden sind. Jedes besteht aus drei schiefen, in eine Spitze auslaufenden Flächen. Aber bei A gehen die Kanten dieser Flächen nach den Ecken des Prismas, während bei B die Kanten der Endflächen nach den Mitten der Längsseiten des Pris-

Digitized by Google

mas führen. Das Ende A ist als der **analoge**, und B als der **antiloge** Pol bekannt. Steigt die Temperatur des Krystalls, so zeigt A +, B — Elektrizität; lässt man jedoch den Krystall nach der Erhitzung wieder erkalten, so ist die Polarität die umgekehrte; denn während des Sinkens der Temperatur ist B + und A —. Ist die Temperatur konstant, so beobachtet man gar keine elektrische Wirkungen, weder bei hoher, noch bei niedriger Temperatur; auch hört die Erscheinung auf, wenn man den Krystall über 150° C. erhitzt. Dies rührt jedoch, wie Gaugain behauptete, nicht davon her, dass der Krystall bei jener Temperatur ein Leiter wird; denn sein Widerstand ist selbst bei jener hohen Temperatur noch so gross, dass er in Wirklichkeit zu den Nichtleitern gehört. Ein erhitzter Krystall

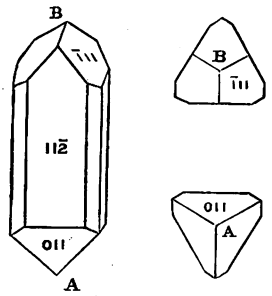

Fig. 35.

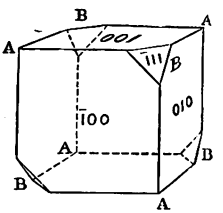

Fig. 36.

aus Turmalin, den man an einem seidenen Faden aufgehängt hat, kann von elektrischen Körpern oder einem zweiten erhitzten Turmalin angezogen oder abgestossen werden, wobei zwei gleiche Pole sich abstossen, während zwei ungleiche Pole sich anziehen. Wird ein Krystall zerbrochen, so besitzt jeder Bruchteil wieder einen analogen und einen antilogen Pol.

67. Viele andre Krystalle ausser dem Turmalin sind mehr oder weniger pyro-elektrisch. Zu ihnen gehören Zinksilikate (elektrischer Galmei), Boracit, Rohrzucker, Quartz, *neutrales weinsaures Kali*, schwefelsaures Chinin und andre mehr. *Boracit* krystallisiert in der in Fig. 36 abgebildeten Gestalt, welche einen Würfel darstellt, der an 4 gegenüberliegenden

Digitized by Google

Ecken abgestumpft ist. Die nicht abgestumpften Ecken verhalten sich wie analoge Pole, die abgestumpften wie antiloge. Diese eigentümliche Quersymmetrie oder Hemiedrie zeigen alle oben genannten Krystalle; dieselbe rührt ohne Zweifel von der nämlichen molekularen Beschaffenheit her, welche ihre sonderbare elektrische Eigenschaft bestimmt, und die in vielen Fällen auch das optische Verhalten des Krystalls bei polarisiertem Lichte bestimmt.

68. Tierische Elektrizität. Verschiedene Arten von im Wasser lebenden Tieren besitzen die Eigenschaft, durch gewisse Teile ihres Organismus elektrische Entladungen zu erzeugen. Am meisten bekannt von ihnen sind der *Torpedo*, der *Gymnotus* und der *Silurus*, welche sich im Nil und Niger finden. Der **Raja Torpedo** [1]) oder elektrischer Rochen, von welchem 3 Arten das Mittelländische Meer und den Atlantischen Ozean bewohnen, ist auf der Rückseite seines Kopfes mit einem elektrischen Organ versehen, wie es in Fig. 37 abgebildet ist. Dies Organ besteht aus dünnen, von polygonalen Zellen gebildeten Platten, 800 bis 1000 an der Zahl oder noch mehr, die mit 4 grossen Bündeln von Nervenfasern versehen sind. Die untere Seite des Fisches ist —, die obere + elektrisch. Bei dem **Gymnotus electricus** oder Su-

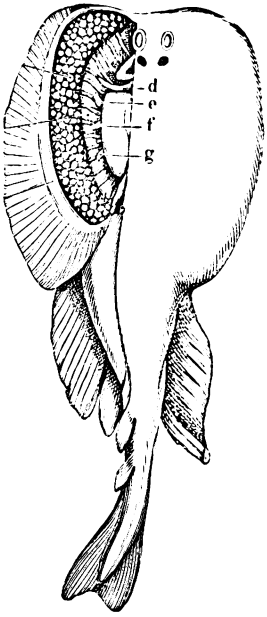

Fig. 37.

1) Es ist ein merkwürdiger Umstand, dass der arabische Name für torpedo, ra-ad, soviel bedeutet wie Blitz. Das ist jedoch vielleicht nicht so merkwürdig, wie dies, dass die Electra in der Homerischen Erzählung gewisse Eigenschaften besitzen sollte, welche zu der Annahme berechtigten, sie wäre eine Personifizierung des Blitzes. Die Aehnlichkeit zwischen den Wörtern Electra und Electron (Bernstein) kann nicht zufällig sein.

Digitized by Google

rinam'schen Aal (Fig. 38) zieht sich das elektrische Organ zu beiden Seiten der Länge nach durch den ganzen Körper. Derselbe ist im Stande, einen höchst empfindlichen Schlag zu er-

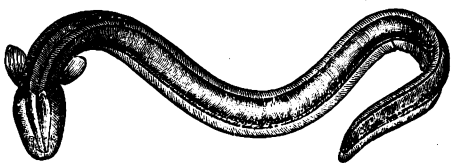

Fig. 38.

teilen und ist ein furchtbarer Gegner, wenn er seine volle Länge von 5 bis 6 Fuss erreicht hat. Humboldt gibt uns eine lebhafte Schilderung der Kämpfe zwischen den elektrischen Aalen und den wilden Pferden, die von den Eingeborenen in die vom Gymnotus bewohnten Sümpfe getrieben werden.

Nobili, Matteucci und andre haben gezeigt, dass Nervenerregung und Muskelzusammenziehung auch beim Menschen schwache elektrische Entladungen zur Folge haben.

69. Elektrizität der Pflanzen. Buff glaubte Elektrizität zu entdecken, welche durch das Leben der Pflanze hervorgerufen würde; die Wurzeln und saftigen Teile seien — und die Blätter + elektrisch. Doch ist dies Gebiet noch wenig untersucht worden.

70. Thermo-Elektrizität. Wenn man zwei verschiedene, zusammengelötete Metalle an ihrer Verbindungsstelle *erwärmt*, so wird hier ein elektrischer Strom erzeugt. Dies Kapitel ist in der 34. Vorlesung unter *Thermo-elektrischen Strömen* behandelt.

71. Berührung ungleicher Metalle. Volta zeigte, dass die Berührung zweier ungleichen Metalle an ihren Oberflächen entgegengesetzte Elektrizitäten erzeugte, indem die eine +, die andere — elektrisch wurde. Dieses bewies er auf verschiedene Art; einen der überzeugendsten Beweise lieferte er mit Hilfe seines *Kondensator-Elektroskopes*. Dasselbe bestand aus einem Goldblattelektroskop, mit welchem ein kleiner Kondensator verbunden war. Eine Metallplatte bildete den obern Teil des

Digitized by Google

Elektroskopes, und auf sie war eine zweite, mit einem Handgriff versehene Metallplatte gesetzt, welche von der untern dadurch isoliert wurde, dass ihre Oberfläche sorgfältig gefirnisst war (Fig. 68). Da die Kapazität eines solchen Kondensators sehr gross ist, so kann eine sehr schwache Elektrizitätsquelle dem Kondensator eine gewisse Menge Elektrizität zuführen, ohne dass sein Potential dadurch wesentlich erhöht oder die Goldblätter zum Divergieren veranlasst würden. Wird jedoch die obere Platte abgehoben, so nimmt die Kapazität der untern Platte beträchtlich ab und das Potential ihrer Ladung steigt, wie die Divergenz der Goldblätter anzeigt. Um mit dem Kondensator-Elektroskop zu beweisen, dass Berührung ungleicher Metalle Elektrizität erzeugt, nimmt man einen kleinen aus zwei ungleichen Metallen, z. B. Zink und Kupfer, zusammengelöteten Stab in die Hand, und berührt mit seinem einen Ende die untere Platte, während man die obere Platte mit dem Erdboden verbindet oder mit dem Finger berührt. Wenn die beiden entgegengesetzten Ladungen sich auf diese Weise in dem Kondensator angesammelt haben, entfernt man die obere Platte, und das Divergieren der Goldblätter lässt das Vorhandensein einer freien Ladung erkennen, welche dann nachher darauf hin untersucht werden kann, ob sie + oder — ist. Lange Zeit wurde das Dasein dieser Berührungselektrizität in Abrede gestellt, oder vielmehr behauptete man, dass dieselbe (wenn sie in Volta'schen Verbindungen auftrat, wie sie in der 13. Vorlesung beschrieben sind) von chemischen Wirkungen herrühre; in Wirklichkeit jedoch rühren sowohl die Berührungselektrizität als auch die chemischen Vorgänge von den molekularen Beschaffenheiten der sich berührenden Körper her. Allerdings kennen wir bis jetzt noch nicht die genaue Natur derjenigen molekularen Beschaffenheiten, welche diese beiden Wirkungen zur Folge haben. Spätere Versuche, besonders die mit den empfindlichen Elektrometern von W. Thomson angestellten (Fig. 101), setzten die Richtigkeit der Entdeckung Volta's ausser Zweifel. Ein einfacher Versuch erklärt die befolgte Methode.

Digitized by Google

Ein dünner Metallstreifen oder eine Metallnadel wird so aufgehängt, dass sie sich um einen Punkt C drehen kann. Durch eine bekannte Quelle wird sie elektrisiert. Unter sie stellt man zwei halbkreisförmige Scheiben oder Halbringe aus ungleichen Metallen (Fig. 39). Keiner von ihnen zieht die elektrisierte Nadel an oder stösst sie ab, bis die beiden Halbringe zur Berührung gebracht oder durch ein drittes Metall mit einander verbunden werden; in diesem Augenblicke dreht sich die Nadel, da sie von dem mit entgegengesetzter Elektrizität geladenen Metall angezogen und von dem mit derselben Elektrizität geladenen abgestossen wird.

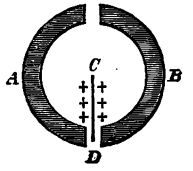

Fig. 39.

72. Volta fand ausserdem noch, dass die Differenzen des elektrischen Potentials zwischen den einzelnen Plattenpaaren nicht alle gleich gross waren. Während z. B. Zink und Blei nur höchst schwach +, resp. — elektrisch wurden, fand er, dass Zink und Silber bedeutend stärker +, resp. — elektrisch wurden. Er konnte die Metalle in einer Reihe so ordnen, dass jedes + elektrisch wurde, wenn es mit einem andern, weiter unten in der Reihe stehenden in Berührung kam. Die schräg gedruckten sind nach Beobachtungen, die nach Volta's Zeit angestellt wurden, hinzugefügt:

Kontakt-Reihe der Metalle (in der Luft).

\+ *Natrium.*
Magnesium.
Zink.
Blei.
Zinn.
Eisen.
Kupfer.
Silber.
Gold.
Platin.
— *Graphit (Kohle).*

Digitized by Google

Obgleich Volta nur ganz rohe Näherungswerte gab, so sind die wahren numerischen Werte der Potentialdifferenzen für die verschiedenen Metallpaare, doch erst in jüngster Zeit von Ayrton und Perry gemessen worden, deren Resultate sich z. T. in folgender Tabelle finden:

	Potentialdifferenz (in Volts)
Zink Blei	0,210
Zinn Eisen	0,069
Kupfer Platin	0,313
Kohle	0,146
	0,238
	0,113

Die Potentialdifferenz zwischen Zink und Kohle ist gleich der Summe aller dazwischen liegenden Potentialdifferenzen, also gleich 1,089 Volt [1]). Volta's Beobachtungen können daher in folgender allgemeiner Form zusammengefasst werden, welche als **Volta'sches Gesetz** bekannt ist: *Die Potentialdifferenz zweier beliebigen Metalle ist gleich der Summe der Potentialdifferenzen der in der Kontakt-Reihe zwischen ihnen stehenden Metalle.*

Es ist höchst wichtig zu bemerken, dass die Aufeinanderfolge der Metalle in der Kontakt-Reihe für Luft fast identisch ist mit derjenigen, wo die Metalle nach ihrer elektrochemischen Kraft geordnet sind, welche aus ihren chemischen Aequivalenten und ihrer Verbindungswärme mit Sauerstoff berechnet ist. (Man vergleiche die Tabelle im Art. 422 a). Hieraus scheint hervorzugehen, dass die Potentialdifferenz zwischen einem Metalle und der es umgebenden Luft ein Maass ist für das Streben jenes Metalls, an der Luft zu oxydieren. Wenn dies der Fall wäre, und wenn die Luft ein schlechter Leiter wäre (wie sie es in der That ist), während die Metalle gute Leiter sind, so müsste

1) In betreff der Definition für Volt, oder Einheit der Potentialdifferenz sehe man Art. 323.

Digitized by Google

folgen, dass, wenn 2 verschiedene Metalle sich berühren, sie ihre eigenen Potentiale durch Leitung ausgleichen, dagegen in den Luftschichten, welche sie unmittelbar umgeben, ungleiche Potentiale zurücklassen. Alle genauen Versuche, die bis jetzt angestellt wurden, haben nicht die Potentialdifferenz der Metalle selbst gemessen, sondern diejenige der beiden Luftschichten, welche die Metalle unmittelbar umgeben. Dies ist bei der Theorie der Volta'schen Zelle von grosser Wichtigkeit.

73. Eine Potentialdifferenz wird auch durch die Berührung *zweier verschiedener Flüssigkeiten* erzeugt. Eine *Flüssigkeit und ein Metall* zeigen bei ihrer Berührung ebenfalls eine Potentialdifferenz.

Wird ein *heisses* Metall mit einem *kalten* Stück von demselben Metall in Berührung gebracht, so wird ebenfalls eine Potentialdifferenz erzeugt, wobei die Scheidung der Elektrizitäten an der Berührungsstelle stattfindet.

Kürzlich zeigte Professor J. J. Thomson, dass die Berührungsfläche zwischen 2 Nichtleitern, wie z. B. Siegellack und Glas, der Sitz einer permanenten Potentialdifferenz ist.

74. Magnet-Elektrizität. Man kann die Elektrizität als Ströme, welche in Drähten fliessen, auch dadurch erhalten, dass man geschlossene, leitende Drähte in der Nähe von Magneten bewegt. Da diese Quelle der Elektrizität Ströme statt statischer Ladungen liefert, so ist ihre Erklärung der 36. Vorlesung vorbehalten.

75. Rekapitulation. Wir haben in den vorhergehenden Artikeln gesehen, wie fast alle denkbaren Kräfte Elektrizität in den Körpern erzeugen könnnen. Die hauptsächlichsten unter ihnen sind Reibung, Wärme, chemische Wirkung, Magnetismus und die Berührung ungleicher Körper. Wir bemerkten, dass die Elektrizitätserregung durch Reibung hauptsächlich von der molekularen Beschaffenheit der Oberflächen abhängt. Wir können hier noch hinzufügen, dass die Potentialdifferenz, welche durch die Berührung ungleicher Körper erzeugt wird, ebenfalls sich nach der Temperatur und der Beschaffenheit des Mediums

Digitized by Google

(Luft, luftleerer Raum etc.) in welchem die Versuche angestellt werden, richtet. Ohne Zweifel hängt diese Quelle auch von den molekularen Beschaffenheiten der verschiedenen Körper ab, da die Moleküle an den Oberflächen von verschiedener Grösse und Gestalt sind und mit verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Intensitäten schwingen. Es bestehen gute Gründe (Art. 10) für die Annahme, dass die Reibungselektrizität in Wirklichkeit von der Berührungselektrizität herrührt, welche successive an den einzelnen Stellen ihrer über einander hinbewegten Oberflächen erzeugt wird. Von den molekularen Beschaffenheiten der Körper jedoch, welche die Erregung der Elektrizität bestimmen, da wo sie in Berührung kommen, weiss man bis jetzt wenig oder nichts.

Digitized by Google

KAPITEL II.

MAGNETISMUS.

VIII. VORLESUNG: *Magnetische Anziehung und Abstossung.*

76. Natürliche Magnete. Der Name Magnet *(Magnes Lapis)* wurde von den Alten gewissen harten, schwarzen Steinen zuerteilt, welche man in verschiedenen Gegenden fand, besonders bei *Magnesia* in Kleinasien, und welche die Eigenschaft besassen, kleine Eisen- oder Stahlstücke anzuziehen. Diese nach ihren Begriffen magische Eigenschaft machte den Magnetstein berühmt; doch erst im 10. oder 12. Jahrhundert entdeckte man, dass solche Steine die noch merkwürdigere Eigenschaft besässen, nach Norden, resp. Süden zu zeigen, falls man sie an einem Faden aufhing. Letztere Eigenschaft benutzte man bei der Schifffahrt [1]). Der natürliche Magnet ist ein Eisenerz, welches den Mineralogen unter dem Namen *Magnetit* bekannt ist, und die chemische Zusammensetzung $Fe_3 O_4$ hat. Dieses Erz findet sich massenhaft in Schweden, Spanien, Arkansas, auf der Insel Elba und in andern Gegenden, allerdings nicht immer in magnetischem Zustande. Es tritt häufig krystallisiert auf, und dann gewöhnlich in regulären Oktaedern.

77. Künstliche Magnete. Wenn man ein Stück Eisen oder besser, ein Stück harten Stahls, mit einem natürlichen Magnete streicht, so findet man, dass dasselbe ebenfalls die

---

1) Von jener Zeit erhielt der Magnet in England den Namen lodestone oder leading stone, d. h. leitender Stein.

Digitized by Google

charakteristischen Eigenschaften eines Magnets erhalten hat; d. h. es zieht leichte Eisenteilchen an und zeigt, an einem Faden aufgehängt, nach Norden, resp. Süden. In Fig. 40 und 41

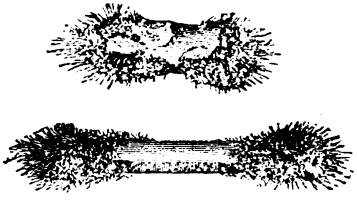

Fig. 40 und 41.

erblickt man einen natürlichen Magnet und einen künstlichen Stahlmagnet, welche beide in Eisenfeilspähne getaucht sind; letztere werden angezogen und bleiben in Büscheln haften.

78. Entdeckungen des Dr. Gilbert. Das Vorstehende war Alles oder doch nahezu Alles, was bis zum Jahre 1600 vom Magnet bekannt war. Da veröffentlichte Dr. Gilbert eine grosse Zahl von Entdeckungen auf dem Gebiete des Magnetismus in seinem berühmten Werke: *De Magnete.* Er beobachtete, dass die anziehende Kraft eines Magneten an zwei Stellen zu wohnen scheint, und in einem länglichen Magnet diese Stellen oder **Pole** sich gewöhnlich an den Enden finden. (Man sehe Fig. 40 und 41.) Derjenige Teil des Magnets, welcher sich zwischen den Polen befindet, ist sichtlich weniger magnetisch, und zieht die Eisenfeilspähne nicht so stark an; und in der Mitte zwischen den Polen findet um den ganzen Magnet herum überhaupt keine Anziehung statt. Diese Stelle nannte Gilbert den **Aequator** des Magnets und eine die Pole verbindende Linie bezeichnete er als **Achse.**

79. Magnet-Nadel. Um die magnetischen Kräfte genauer zu untersuchen, gebraucht man eine **Magnetnadel.** Diese besteht (Fig. 42) aus einer leichten Stahlnadel, welche mit einem kleinen Hute von Messing, Glas oder Achat versehen ist, vermittelst dessen die Nadel auf eine scharfe Spitze gesetzt wird, so dass sie sich mit ganz geringer Reibung drehen kann.

Digitized by Google

Durch Streichen mit einem Magnet wird sie selbst zum Magneten gemacht. Nachdem sie auf diese Weise magnetisiert ist, stellt sie sich in die Nord-Süd-Lage, oder wie wir sagen, in den magnetischen Meridian (Art. 136). Der *Kompass*, welchen man vom Mechaniker kauft, besteht aus einer solchen' über einer Windrose schwebenden Nadel.

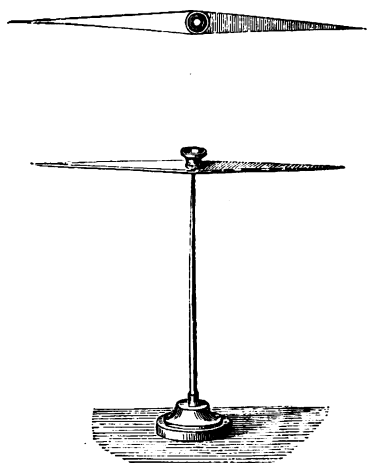

Fig. 42.

80. Magnetische Anziehung und Abstossung. Wenn wir einen natürlichen oder künstlichen Magnet in die Hand nehmen, und die beiden Pole desselben nach einander dem nach Norden zeigenden Ende einer Magnetnadel nähern, so bemerken wir, dass der eine Pol des Magnets die Nadel *anzieht*, während der andere sie *abstösst* (Fig. 43). Wenn wir den Versuch bei dem nach Süden zeigenden Ende der Magnetnadel wiederholen, so finden wir, dass dieselbe von dem einen Pole *abgestossen* und von dem andern *angezogen* wird; und dass derselbe Pol, welcher das nach Norden zeigende Ende der Magnetnadel abstösst, das nach Süden zeigende Ende anzieht.

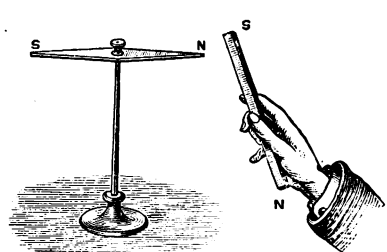

Fig. 43.

Wenn wir einen ähnlichen Versuch mit der Magnetnadel anstellen, und statt eines Magneten eine zweite magnetisierte Nadel gebrauchen, welche vorher auf eine Spitze aufgesetzt worden ist, und bei der wir das nach Norden zeigende Ende *markiert* haben, um dasselbe von dem nach Süden zeigenden Ende unter-

Digitized by Google

scheiden zu können, so stellt sich heraus, dass der nach Norden zeigende Pol den nach Norden zeigenden Pol abstösst, und dass der nach Süden zeigende Pol den nach Süden zeigenden Pol ebenfalls abstösst; dass dagegen ein nach Norden zeigender Pol einen nach Süden zeigenden Pol anzieht und selbst von demselben angezogen wird.

81. Zwei Arten von magnetischen Polen. Daraus scheint hervorzugehen, dass es zwei entgegengesetzte Arten des Magnetismus gibt, oder jedenfalls zwei entgegengesetzte Arten von Magnetpolen, welche einander in genau derselben Weise anziehen oder abstossen, wie die beiden entgegengesetzten Arten der Elektrizität; die eine Art des Magnetismus scheint das Bestreben zu haben, sich nach Norden zu wenden, und die andere Art, nach Süden. Man hat den Vorschlag gemacht, diese beiden Arten des Magnetismus den Nordsuchenden und den Südsuchenden Magnetismus zu nennen; für unsern Zweck genügt es jedoch, zwischen den beiden Arten von Polen zu unterscheiden. In der gewöhnlichen Ausdrucksweise nennt man die Pole eines Magnets den Nordpol, resp. den Südpol, und diejenigen, welche Magnete anfertigen, bezeichnen gewöhnlich den nach Norden zeigenden Pol mit dem Buchsaben N. Derselbe heisst daher bisweilen der bezeichnete Pol, um ihn von dem nach Süden zeigenden oder nichtbezeichneten Pole zu unterscheiden. Um jeden Zweifel [1]) zu vermeiden, wollen wir

---

1) Man muss in dieser Beziehung präzis sein, da in den vorhandenen Lehrbüchern sich manche Verwechslungen finden. Der Grund derselben ist folgender: Wenn der nach Norden zeigende Pol einer Nadel von dem am Nordpol der Erde befindlichen Magnetismus angezogen wird, so müssen nach dem Gesetze der Anziehung (dass ungleiche Pole sich anziehen) diese beiden Pole in der That entgegengesetzte Arten des Magnetismus haben. Welche Art sollen wir nun Nordmagnetismus nennen? Diejenige, welche sich am Nordpol der Erde findet? Dann müssten wir sagen, dass der nach Norden zeigende Pol der Nadel Südmagnetismus enthält. Und wenn wir diejenige Art Nordmagnetismus nennen, welche nach Norden zeigt, so müssten wir annehmen, dass der magnetische Pol am Nordpol der Erde Südmagnetismus in sich enthielte. In beiden Fällen stösst man auf Schwierigkeiten.

Digitized by Google

denjenigen Pol eines Magnets, der, wenn der Magnet aufgehängt ist, das Bestreben hat, sich nach Norden zu kehren, den nordsuchenden Pol nennen, und den andern den südsuchenden Pol.

Wir können daher unsere Beobachtungen kurz so zusammenfassen: *Gleiche magnetische Pole stossen sich ab, ungleiche Pole ziehen sich an.* Dies können wir das erste Gesetz des Magnetismus nennen.

82. Die beiden Pole sind untrennbar. Es ist unmöglich, einen Magnet mit nur einem Pole herzustellen. Wenn wir ein Stück Stahldraht oder eine Uhrfeder magnetisieren, indem wir dieselben mit dem einen Pole eines Magnets streichen, so finden wir, dass der Draht, resp. die Uhrfeder doch 2 Pole haben, einen nordsuchenden und einen südsuchenden. Und wenn wir sie in zwei Teile zerbrechen, so hat jeder Teil wieder 2 Pole entgegengesetzter Art.

83. Magnetische Kraft. Die Kraft, mit welcher ein Magnet einen andern Magnet oder ein Stück Eisen oder Stahl anzieht oder abstösst, wollen wir *magnetische Kraft* [1]) nennen. Die von einem Magnet auf ein Stück Eisen oder einen andern Magnet ausgeübte Kraft ist nicht für alle Entfernungen dieselbe; je näher der Magnet ist, desto grösser ist die Kraft und umgekehrt. In der That nimmt die Anziehung eines Magnetpoles im umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung vom Pole ab. (Man sehe Art. 117.)

Jedesmal wenn eine Kraft zwischen zwei Körpern wirkt,

Die Chinesen und Franzosen nennen den nach Norden zeigenden Pol der Nadel einen Südpol und den nach Süden zeigenden einen Nordpol. W. Thomson nennt den nach Norden zeigenden Pol ebenfalls einen »wahren Südpol«. Die gewöhnliche Praxis schlägt jedoch den andern Weg ein, und nennt den nach Norden zeigenden Pol eines Magnets seinen Nordpol. Für Versuche färbt man die beiden Pole eines Magnets gewöhnlich mit verschiedenen Farben, und zwar den nordsuchenden Pol rot und den südsuchenden Pol blau.

1) Man sehe die Anmerkung über Kraft im Art. 155.

Digitized by Google

wirkt sie auf beide und sucht beide zu bewegen. Ein Magnet zieht ein Stück Eisen an, und ein Stück Eisen zieht einen Magnet an. Dies zeigte Isaak Newton, indem er einen Magnet auf einem Korke befestigte und ihn in einem mit Wasser gefüllten Bassin schwimmen liess (Fig. 44). Er fand, dass der Magnet sich auf dem Wasser fortbewegte, wenn er ihm ein Stück Eisen näherte. Eine auf solche Weise schwimmende Kompass-Nadel dreht sich im Kreise und zeigt nach Norden und Süden; doch bewegt sich die Nadel als Ganzes weder nach Norden, noch nach Süden. Den Grund hierfür findet man weiter unten in Art. 117.

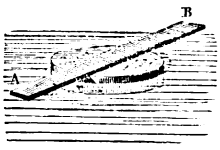

Fig. 44.

Gilbert schlug vor, die Kraft eines Magnets dadurch zu messen, dass man ihn ein an dem einen Arme einer Wagschale hängendes Stück Eisen anziehen lässt, während man in die Wagschale des andern Armes Gewichte legt; und er fand dann, als er den *Magnet* an die Wagschale hing und das Stück *Eisen* darunter hielt, dass die hervorgebrachte Wirkung dieselbe war. Wirkung und Gegenwirkung sind daher für magnetische Kräfte gleich.

84. Anziehung durch Körper hindurch. Wenn man eine Glasscheibe oder ein hölzernes Brett oder ein Blatt Papier zwischen einen Magnet und das von ihm anzuziehende Stück Eisen oder Stahl hält, so zieht er dasselbe noch ebenso an, als ob nichts dazwischen wäre. Ein in einer versiegelten Glasröhre befindlicher Magnet wirkt noch als solcher. Lucretius fand, dass ein in einem Messinggefässe befindlicher Magnet auf Eisenfeilspähne noch durch das Messing hindurch anziehend wirkte. Gilbert umgab einen Magnet auf allen Seiten mit Flammen, und fand, dass derselbe der magnetischen Anziehung von aussen her noch unterworfen war. Durch Wasser, den luftleeren Raum, und alle bekannten Körper wirken die magnetischen Kräfte, mit der alleinigen Ausnahme jedoch, dass die magnetische Kraft nicht durch *Eisen* oder andere magnetische

Digitized by Google

Körper hindurch wirkt. Wenn man einen kleinen Magnet im Innern einer eisernen Hohlkugel aufhängt, so wirkt kein aussen befindlicher Magnet auf ihn ein. Ein hohles eisernes Gehäuse wirkt daher als *magnetischer »Käfig«*, und schützt seinen Innenraum vor magnetischen Einwirkungen.

85. Magnetische Substanzen. Gilbert machte einen Unterschied zwischen *Magneten* und *magnetischen Substanzen.* Ein Magnet zieht nur an seinen Polen an, und diese besitzen entgegengesetzte Eigenschaften. Aber ein Stück Eisen zieht beide Pole des Magnets an, gleichviel, welcher Teil des Eisens dem Magnet genähert wird. Dasselbe hat keine unterscheidbaren festen Pole und keinen magnetischen Aequator. Ein wirklicher Magnet hat Pole, von denen einer von dem Pole eines andern Magnets *abgestossen* wird.

86. Andere magnetische Metalle. Durch spätere Versuche ist die Liste derjenigen Körper, welche von einem Magnet angezogen werden, vervollständigt. Ausser Eisen (und Stahl) hat man noch folgende Metalle als magnetisch erkannt:

Nickel, Chrom, Mangan
Kobalt, Cerium,

nebst einigen anderen. Doch nur Nickel und Kobalt sind mit Eisen und Stahl in Betreff der magnetischen Kraft überhaupt zu vergleichen, und selbst diese stehen ihnen noch bedeutend nach. Andere Körper, verschiedene Eisensalze und andere Metalle, Papier, Porzellan und Sauerstoffgas, werden ebenfalls von einem kräftigen Magnet in schwachem Grade angezogen.

87. Diamagnetismus. Eine Anzahl von Körpern, namentlich Wismuth, Antimon, Phosphor und Kupfer werden von den Polen eines Magnets abgestossen. Solche Körper heissen *diamagnetisch;* etwas ausführlicheres über dieselben findet sich in der 28. Vorlesung.

88. Die Erde ein Magnet. Gilbert's wichtigste Entdeckung war die von dem der Erde innewohnenden Magnetismus. *Die Erde ist selbst ein grosser Magnet,* dessen Pole beinahe, jedoch nicht ganz, mit dem geographischen Nord- resp. Süd-

Digitized by Google

pole zusammenfallen, und deshalb veranlasst die Erde einen frei aufgehängten Magnet, sich in die Nord-Südlage zu stellen. Die Lehre vom *Erdmagnetismus* findet sich in der 12. Vorlesung. Aus dem ersten Gesetze vom Magnetismus geht hervor, dass der magnetische Zustand des Nordpols der Erde dem des nordsuchenden Pols einer Magnetnadel entgegengesetzt sein muss. Daraus entsteht die auf Seite 80 angeführte Schwierigkeit.

89. Magnetische Induktion. Wir können einem Stücke Eisen Magnetismus mittheilen, ohne dasselbe wirklich mit einem Magnet zu berühren. Wenn wir einen kurzen, dünnen, nicht magnetischen Eisenstab neben etwas Eisenfeilspähne legen und ihm dann einen Magnet nähern, so wird durch die Nähe des Magnets in dem Eisenstabe Magnetismus *induziert*, und derselbe zieht jetzt die Eisenfeilspähne an (Fig. 45). Diese Induktions-

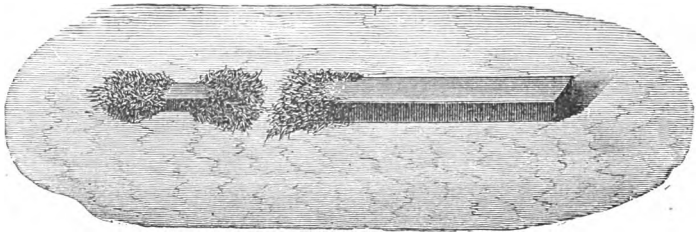

Fig. 45.

Wirkung ist der in der 3. Vorlesung beschriebenen, welche stattfindet, wenn ein elektrischer Körper einem nichtelektrischen genähert wird, sehr ähnlich. Die Analogie geht in der That noch weiter, denn wir finden, dass der auf diese Weise durch Induktion magnetisierte Eisenstab zwei Pole hat; der dem Pole des induzierenden Magnets nächste Pol ist von entgegengesetzter Art, während der Pol am entfernten Ende des Stabes denselben Magnetismus hat wie der induzierende Pol. Magnetismus kann jedoch nur in den Körpern induziert werden, die wir als magnetische Körper aufgezählt haben; und von den Körpern, bei welchen eine magnetisierende Kraft einen hohen Grad des Magnetismus erzeugt, sagt man, sie besitzen einen

Digitized by Google

grossen *Koeffizienten der Magnetisierung* oder die *Magnetisierungsfunktion* habe einen grossen Wert. Es wird sogleich gezeigt werden, dass die magnetische Induktion längs gewisser Richtungen statt findet, die man *Linien der magnetischen Induktion* oder *Linien der magnetischen Kraft oder magnetische Kraftlinien* nennt. Dieselben gehen sowohl durch Eisen und andere magnetische Media, als auch durch Luft, den luftleeren Raum, Glas oder andere nicht magnetische Media; und da die Induktion in Körpern von hoher magnetischer Empfänglichkeit sehr leicht vor sich geht, so sagt man bisweilen, obgleich nicht ganz richtig, jene Kraftlinien gingen vorzugsweise durch magnetischen Stoff, oder, magnetischer Stoff sei ein Leiter der Kraftlinien.

Obgleich die magnetische Induktion auch aus der Entfernung durch eine dazwischen befindliche Schicht von Luft, Glas oder luftleeren Raum hindurch wirkt, so kommt doch ohne Zweifel das dazwischen befindliche Medium bei der Uebertragung der magnetischen Kraft direkt in Betracht, obschon das wahre Medium wahrscheinlich der die Moleküle der Materie umgebende Aether ist, und nicht die Moleküle selbst.

Wir können uns jetzt klar machen, weshalb ein Magnet ein vorher nicht magnetisches Stück Eisen anzieht; derselbe magnetisiert es zunächst durch Induktion und zieht es dann an; denn in dem nächstgelegenen Ende wird die entgegengesetzte Art des Magnetismus induziert, und dasselbe wird dann mit einer Kraft angezogen, welche diejenige, womit das entfernte Ende abgestossen wird, übertrifft. Aber *die Induktion geht der Anziehung voraus.*

90. Remanenter Magnetismus. Nicht alle magnetischen Substanzen können permanent zu Magneten werden. Magnetstein, Stahl und Nickel, behalten den grössern Teil des ihnen mitgeteilten Magnetismus permanent. Gusseisen und manche unreinen Sorten des Schmiedeeisens behalten ebenfalls den Magnetismus in unvollkommener Weise. Reines weiches Eisen ist jedoch nur zeitweise (temporär) magnetisch. Folgender Versuch macht dies klar. Man nehme ein paar kleine

Digitized by Google

Eisenstäbe oder einige Nägel aus weichem Eisen. Wird einer von ihnen an den einen Pol eines permanenten Stahlmagnets gehängt (Fig. 46), so wird derselbe angezogen und wird selbst ein temporärer Magnet. An ihn kann man einen zweiten Eisenstab hängen, an diesen einen dritten u. s. w., bis man eine Kette von 4 bis 5 Eisenstäben aufgebaut hat. Wenn man jedoch den Stahlmagnet von dem obersten Stabe der Kette wegnimmt, so fallen alle übrigen ab, und es ergibt sich, dass sie nun nicht mehr Magnete sind. Es lässt sich eine ähnliche Kette aus Stahlnadeln bilden; diese jedoch behalten ihren Magnetismus permanent. — Man findet jedoch, dass eine Stahlnadel schwieriger zu magnetisieren ist, als eine Eisennadel von derselben Grösse. Es ist schwieriger, den Magnetismus dem Stahl mitzuteilen, als dem Eisen, und ebenso ist es schwieriger, den Magnetismus dem Stahl zu entziehen, als dem Eisen; denn Stahl behält den einmal ihm mitgeteilten Magnetismus. Dieser Widerstand gegen das Magnetisieren oder Entmagnetisieren wird bisweilen *Koercitiv-Kraft* genannt; ein bei weitem besserer Ausdruck, welcher von Lamont herrührt, ist **Retentionskraft.** Die Retentionskraft des hart angelassenen Stahls ist gross; die des weichen Schmiedeeisens sehr klein. Je härter der Stahl, desto grösser seine Retentionskraft.

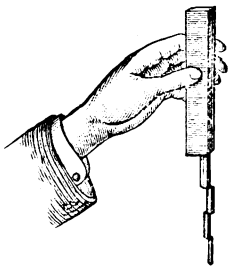

Fig. 46.

91. Theorieen des Magnetismus. Der Leser wird jedenfalls die auffallenden Analogieen zwischen den Erscheinungen der Anziehung, Abstossung, Induktion etc. des Magnetismus und denen der Elektrizität bemerkt haben. Und doch haben beide Reihen von Naturerscheinungen nichts mit einander zu thun. Ein + elektrischer Körper zieht weder den nach Norden, noch den nach Süden zeigenden Pol des Magnets als solchen an; freilich zieht derselbe jeden Pol an, gleichviel welchen Magnetismus er hat, aber eben nur so wie irgend einen

Digitized by Google

andern Körper. Zwischen Magneten und statischen elektrischen *Ladungen* kennt man keine Beziehung. Dagegen existiert eine direkte Beziehung zwischen Magneten und elektrischen *Strömen,* wie wir weiter unten auseinandersetzen werden.

Bis jetzt wurde noch keine Theorie über die Natur des Magnetismus dem Leser mitgeteilt,. derselbe ist nur mit den fundamentalen *Thatsachen* bekannt gemacht, ohne Zugrundelegung einer bestimmten Richtung. In vielen Lehrbüchern ist es Usus, von einem, resp. zwei *magnetischen Fluidis* zu sprechen; es ist aber *absolut sicher, dass der Magnetismus kein Fluidum ist,* was er sonst auch sein möge. Der Ausdruck, welcher ein Ueberbleibsel vergangener Zeiten ist, wird bloss deshalb geduldet, weil sich der Magnetismus unter gewissen Umständen in magnetischen Körpern auf dieselbe Weise verteilt, wie es ein elastisches Fluidum thun würde. Doch sind die Gründe, welche gegen die Annahme, dass der Magnetismus ein Fluidum ist, sprechen, noch entscheidender als im Falle der Elektrizität. Wird ein elektrischer Körper mit einem Leiter in Berührung gebracht, so elektrisiert er denselben, indem er ihm einen Teil seiner Elektrizität abgibt. Wenn man jedoch mit einem Magnet ein Stück Stahl streicht, so wird letzteres magnetisch, *ohne dass der Magnet auch nur das geringste von seinem Magnetismus verloren hat.* Ein Fluidum kann sich ohne Verlust unmöglich bis ins Unendliche ausbreiten. Die Gründe, welche man aus dem Verhalten eines Magnets beim Zerbrechen herleitet oder aus andern, in der zehnten Vorlesung beschriebenen Versuchen, sind noch triftiger. Deshalb wollen wir nicht eher eine Theorie des Magnetismus vortragen, bis der Leser mit diesen Thatsachen bekannt gemacht worden ist.

IX. VORLESUNG: *Methoden zur Anfertigung von Magneten.*

92. Magnetisierung durch einfachen Strich. Wir haben bisher angenommen, dass Stahlstäbe oder Nadeln dadurch zu magnetisieren seien, dass man sie mit dem einen Pole eines

Digitized by Google

permanenten Magnets von Eisenerz oder Stahl einfach berührt oder sie damit der Länge nach streicht. In diesem Falle wird die zuletzt berührte Stelle des Stabes ein Pol, welcher dem zum Streichen benutzten entgegengesetzt ist. Eine sicherere Wirkung erzielt man, wenn man das eine Ende der Stahlnadel mit dem einen Pole des Magnets, und das andere Ende mit dem andern Pole streicht. Es gibt jedoch noch bessere Methoden, einen Stab oder eine Nadel zu magnetisieren.

93. Magnetisierung durch Doppelstrich mit getrennten Magneten. Bei dieser Methode wird der zu magnetisierende Stab horizontal gelegt und zwei Stabmagnete werden alsdann so auf denselben gesetzt, dass ihre entgegengesetzten Pole neben einander sind. Dieselben werden dann von der Mitte des Stabes nach seinen beiden Enden geführt und wieder zurück, mehrere Male. Der Stab wird dann umgewendet und die Operation wiederholt, wobei man zu beachten hat, die Magnete in der Mitte des Stabes abzuheben. (Man sehe Fig. 47.)

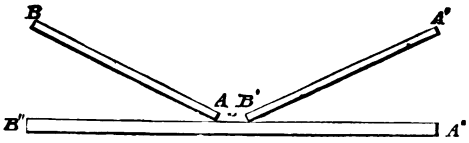

Fig. 47.

Die Wirkung ist kräftiger, wenn man während des Streichens den Stab mit seinen Enden auf die Pole zweier andern Stabmagnete legt, so dass die Pole dieselben sind wie die der beiden Magnete, welche über ihnen zum Streichen des Stahlstabes benutzt werden.

94. Magnetisierung durch Doppelstrich mit vereinten Magneten. Eine andere Methode weicht etwas von der zuletzt beschriebenen ab. Ein Stück Holz oder Kork wird zwischen die Enden der beiden zu benutzenden Stabmagnete gelegt, welche dann beide zusammen vorwärts und rückwärts längs des zu magnetisierenden Stabes geführt werden. Bei kei-

Digitized by Google

ner dieser Methoden kann jedoch ein Stahlstab über einen gewissen Grad der Intensität magnetisiert werden.

95. **Lamellen-Magnete.** Man hat gefunden, dass lange dünne Stahlmagnete im Verhältniss zu ihrem Gewichte kräftiger sind, als dickere. Deshalb schlug Scoresby [1]) vor, zusammengesetzte Magnete zu konstruieren, bestehend aus dünnen Stahlplatten, welche erst einzeln magnetisiert und dann in Bündeln zusammengebunden wurden. Diese Lamellenmagnete sind kräftiger als einfache Stahlstäbe.

96. **Magnetisierung durch die Erde.** Wenn man nicht über einen Stabmagnet verfügt, so kann man den Magnetismus der Erde verwerten, um einen Stahlstab zu magnetisieren. Gilbert fand, dass Eisenstäbe, welche lange Zeit aufrecht gestanden hatten, von der Erde Magnetismus erhielten. Wenn man ein stählernes Schüreisen so in den magnetischen Meridian hält, dass das Nordende nach unten gerichtet ist, und dann dasselbe in dieser Lage mit einem hölzernen Hammer schlägt, so findet man, dass dasselbe magnetische Eigenschaften angenommen hat. Stahldrähte, welche man, solange sich dieselben im magnetischen Meridiane befinden, einer Torsion unterwirft, werden hierdurch ebenfalls magnetisch.

97. **Magnetisierung nach dem Erhitzen.** Gilbert machte auch die Entdeckung, dass ein Stahlstab magnetische Polarität annahm, wenn derselbe bis zur Rotglühhitze erwärmt und dann, während er sich im magnetischen Meridian befand, langsam oder plötzlich abgekühlt wurde. Wird der Stab von Osten nach Westen gerichtet und dann abgekühlt, so nimmt derselbe keine derartige Eigenschaft an. Man hat den Vorschlag gemacht, kräftige Magnete auf die Weise anzufertigen, dass man heisse Stahlstäbe zwischen den Polen sehr kräftiger Elektromagnete erkalten lässt; und Carré hat kürzlich starke Magnete hergestellt, indem er Stahl in Formen gegossen hat,

1) Einen ähnlichen Vorschlag machte Geuns von Venlo im Jahre 1768. Kürzlich hat Jamin ähnliche Magnete konstruiert.

Digitized by Google

welche sich innerhalb eines intensiven magnetischen Feldes befanden.

98. Magnetisierung durch elektrische Ströme. Wird ein starker elektrischer Strom durch einen spiralförmig um einen Eisen- oder Stahlstab gewundenen Draht geführt, so wird der Stab kräftiger magnetisiert als in allen vorhergehenden Fällen. Hat man einen Stab aus weichem Eisen, so wird derselbe ein Magnet aber nur so lange wie der Strom durch die Spirale fliesst. Eine solche Anordnung wird ein **Elektromagnet** genannt; derselbe wird in der 26. Vorlesung ausführlich beschrieben. Elias von Haarlem machte den Vorschlag, Stahlstäbe dadurch zu magnetisieren, dass man sie durch einen in vielen Windungen zu einem Reifen aufgewickelten Draht steckte, durch welchen man alsdann einen starken Strom einer Volta'schen Batterie schickte. Tommasi will Stahlstäbe dadurch magnetisiert haben, dass er einen Strom heissen Dampfes in einer spiraligen Röhre um sie herum führte; doch bedarf die Sache noch weitern Beweises.

99. Vernichtung des Magnetismus. Ein Stahlmagnet verliert seinen Magnetismus zum Teil oder vollständig, wenn derselbe unvorsichtig gehandhabt oder absichtlich geschlagen oder gehämmert wird. Er verliert seinen Magnetismus auch, wie Gilbert zeigte, wenn er bis zur Rotglühhitze erwärmt wird.

100. Wirkungen der Wärme auf das Magnetisieren. Wenn ein permanenter Stahlmagnet erhitzt wird, indem man ihn in heisses oder kochendes Wasser legt, so nimmt seine Stärke dadurch ab, zum Teil gewinnt er dieselbe indessen beim Erkalten wieder. Kühlt man einen Magnet ab, so nimmt seine Stärke zu. Gusseisen wird bei klarer Rotglühhitze oder bei einer Temperatur von ungefähr 700° C. von einem Magnet nicht mehr angezogen. Kobalt behält seinen Magnetismus bei den höchsten Temperaturen. Chrom hört auf magnetisch zu sein bei ungefähr 500° C. und Nickel bei 350° C. Mangan zeigt magnetische Anziehung erst dann, wenn es bis auf — 20° C. abgekühlt ist. Man hat deshalb vermutet, dass andere Metalle

Digitized by Google

ebenfalls magnetisch würden, falls man sie auf eine genügend niedrige Temperatur brächte; allein andererseits zerstört ein sehr energisches Abkühlen bis auf 100° unter Null den Magnetismus der Stahlmagnete. Die magnetischen Metalle werden bei hohen Temperaturen nicht diamagnetisch, sondern sind noch schwach magnetisch.

101. Formen der Magnete. Natürliche Magnete sind gewöhnlich von unregelmässiger Gestalt, obgleich sie bisweilen durch Beschneiden oder Schleifen eine regelmässige Gestalt bekommen. Früher war es gebräuchlich, sie mit Seitenteilen aus weichem Eisen oder Armaturen zu versehen, die als Pole dienten.

Zu wissenschaftlichen Versuchen verwendet man gewöhnlich *Stabmagnete* aus gehärtetem Stahl; zu manchen Zwecken zieht man jedoch die *Hufeisenform* vor. Beim Hufeisenmagnet sind die Polenden so umgebogen, dass sie nahe bei einander liegen; der Vorteil in diesem Falle besteht darin, dass jetzt beide Pole ein und dasselbe Eisenstück anziehen können. Die Armatur oder der Anker, wie man das quer vor die Pole gelegte Stück weichen Eisens nennt, wird durch Induktion selbst zum Magnet, wenn es an die Pole gelegt wird; daher ist die Kraft, mit welcher es vom Magnet angezogen wird, um so grösser, da *beide* Pole es magnetisieren.

102. Magnetische Sättigung. Ein Magnet, dem der stärkste Grad von Magnetismus, den er überhaupt annehmen kann, gegeben ist, heisst *gesättigt*. Einige der beschriebenen Magnetisierungs-Methoden erregen in einem Magnet einen höhern Grad von Magnetismus, als derselbe dauernd bewahren kann. Ein eben magnetisierter Magnet scheint bisweilen *übersättigt* zu sein, selbst dann, wenn die Einwirkung der magnetisierenden Kraft schon aufgehört hat. Ein hufeisenförmiger Stahlmagnet trägt z. B. unmittelbar nach seiner Magnetisierung ein grösseres Gewicht, als dann, wenn seine Armatur schon einmal von seinen Polen abgenommen ist. Sogar weiches Eisen behält, nachdem es magnetisiert wurde, einen kleinen

Digitized by Google

Teil seines Magnetismus, nachdem sein *temporärer Magnetismus* schon verschwunden ist. Diese kleine zurückbleibende magnetische Ladung nennt man *magnetisches Residuum.*

Stärke eines Magnets. Die *Stärke* eines Magnets ist nicht dasselbe wie seine Tragkraft. Die Stärke eines Magnets ist die Stärke seiner Pole. Die Stärke eines Magnetpols muss durch die magnetische Kraft, welche er ausübt, gemessen werden. Angenommen z. B. wir hätten 2 Magnete A und B, deren Stärke wir vergleichen, indem wir jeden auf den N-Pol eines dritten Magnets C wirken lassen. Wenn der N-Pol von A den Magnet C zweimal so stark abstösst, wie der in dieselbe Entfernung gebrachte N-Pol von B, so sagen wir, dass die Stärke von A noch einmal so gross ist, wie die von B. Man kann die Sache auch noch in etwas anderer Weise auffassen und sagen, die Stärke eines Poles ist gleich der Menge von freiem Magnetismus an jenem Pole. Wenn wir die in Art. 125 definierte Krafteinheit magnetischer Pole adoptieren, so können wir die Stärke eines Poles numerisch durch die Anzahl von Krafteinheiten ausdrücken.

103. Tragkraft. Die Tragkraft eines Magnets hängt sowohl von seiner Form als auch von seiner magnetischen Stärke ab. Ein hufeisenförmiger Magnet hebt eine 3 bis 4 mal grössere Last, als ein Stabmagnet von derselben Schwere. Die Tragkraft ist um so grösser, je grösser die Berührungsfläche zwischen den Polen und der Armatur ist. Auch wächst die Tragkraft eines Magnets in höchst merkwürdiger und unerklärlicher Weise, wenn man nach und nach die Last an seiner Armatur vergrössert, bis er eine Last trägt, die er im Anfange nicht hätte tragen können. Wird die Last jedoch derart vergrössert, dass die Armatur abgerissen wird, so sinkt die Kraft des Magnets plötzlich wieder auf ihre ursprüngliche Höhe herab. Die Anziehung zwischen einem kräftigen Elektromagnet und seiner Armatur kann auf 14 Kilogramm pro Quadrat-Zentimeter steigen. Kleine Magnete tragen eine im Verhältnis

Digitized by Google

zu ihrem eigenen Gewichte grössere Last als grosse Magnete [1]). Ein guter hufeisenförmiger Stahlmagnet von einem Pfund Gewicht sollte eine Last von 20 Pfund tragen. Isaac Newton soll einen kleinen, in einen Siegelring gefassten natürlichen Magnet besessen haben, der ein Stück Eisen trug, das 200mal schwerer war, als der Magnet selbst.

X. VORLESUNG: *Verteilung des Magnetismus.*

104. Normale Verteilung. Bei einem gewöhnlichen Stabmagnet finden sich die Pole nicht ganz an den Enden des Stabes, sondern etwas davon entfernt; und es lässt sich darthun, dass dies eine Folge der Art und Weise ist, wie der Magnetismus in dem Stabe verteilt ist. Ein sehr langer, dünner, gleichförmig magnetisierter Stab hat seine Pole an den Enden; aber in gewöhnlichen, dicken Magneten nimmt der »Pol« ein beträchtliches Gebiet ein, der freie Magnetismus nimmt von den Enden des Stabes nach der Mitte zu allmählich ab. Immer aber kann man einen Punkt bestimmen, in welchem die Resultante der magnetischen Kräfte angreift, und den man in den meisten Fällen als Pol betrachten darf. In gewissen Fällen der unregelmässigen Magnetisierung ist es möglich, dass zwischen den Endpolen noch einer oder mehrere andere Pole liegen. Solche Pole heissen *Folge-Pole oder Folgepunkte* (vgl. Fig. 51).

105. Magnetisches Feld. Der einen Magnet umgebende Raum, über welchen sich die magnetischen Kräfte er-

---

1) Bernouilli gab folgende Regel, um die Tragkraft p eines Magnets vom Gewichte w zu finden:

$$p = a \sqrt[\frac{3}{2}]{w},$$

wo a eine Konstante bedeutet, die von der Güte des Stahls und der Methode, ihn zu magnetisieren, abhängt. Bei den besten Stahlmagneten, die V. Wetteren in Haarlem verfertigte, schwankte dieser Koeffizient zwischen 19,5 und 23. Bei den Breguet'schen Magneten, welche aus Allevard-Stahl verfertigt werden, ist dieser Wert ebenso hoch.

Digitized by Google

strecken, heisst das *magnetische Feld* jenes Magnets. Dasselbe ist in der Nähe des Magnetpols am stärksten, und wird um so schwächer, je grösser die Abstände von demselben werden. In jedem Punkte eines magnetischen Feldes hat die Kraft eine bestimmte Intensität, und die magnetische Induktion wirkt in einer bestimmten Richtung oder Linie. Beim Hufeisenmagnet ist das Feld am stärksten zwischen den beiden Polen, und die Linien der magnetischen Induktion sind Kurven, welche durch das Feld von dem einen Pole zum andern führen. Eine praktische Methode, die Verteilung der Induktionslinien in einem Felde zu untersuchen, findet sich in Art. 108, unter der Ueberschrift: Magnetische Figuren. Legt man die Armatur auf die Pole eines Hufeisenmagnets, so wird die Kraft des Magnets auf alle äussern Punkte geschwächt, denn die Induktion geht jetzt nicht durch den umgebenden Raum, sondern durch das Eisen der Armatur. In der That hat ein *geschlossenes System* von Magneten — z. B. ein aus 4 Stabmagneten gebildetes Quadrat, bei welchem der Nordpol des einen den Südpol des nächsten berührt — kein äusseres Kraftfeld. Ein *Stahlring* kann derart magnetisiert werden, dass er weder Pole noch ein äusseres Feld hat; oder vielmehr kann jeder Punkt des Ringes als ein N-Pol und S-Pol zu gleicher Zeit angesehen werden, die so nahe bei einander liegen, dass ihre Kräfte sich gegenseitig aufheben.

Dass entgegengesetzte Pole sich neutralisieren, lässt sich durch das bekannte Experiment nachweisen, wo man einen kleinen Körper, z. B. einen Stahlring oder Schlüssel, an den N-Pol eines Stabmagnets hängt. Wenn man dann diesen mit dem S-Pole eines zweiten Stabmagnets berührt, so neutralisieren die beiden Pole ihre Kräfte, und der Ring oder Schlüssel fällt ab.

106. Zerbrechen eines Magnets. Wir haben bereits gesehen, dass, wenn ein Magnet in 2 oder mehrere Teile zerbrochen wird, jeder Teil wieder ein vollständiger Magnet mit Polen ist, und dass jeder nahezu ebenso stark magnetisiert ist, wie der ursprüngliche Magnet. (Siehe Fig. 48.) Wenn die ab-

Digitized by Google

gebrochenen Teile wieder eng zusammengefügt werden, so neutralisieren sich die an einander anstossenden Pole und ver-

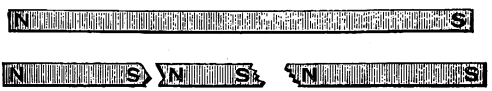

Fig. 48.

schwinden, so dass nur noch die Pole an den Enden übrig bleiben, wie früher. Wenn ein Magnet zu Pulver gemahlen wird, so wirkt jedes Teilchen noch als ein kleiner Magnet und zeigt Polarität. Man kann daher einen Magnet als aus vielen kleinen Magneten bestehend ansehen, welche so zusammengesetzt sind, dass ihre gleichnamigen Pole alle nach derselben Seite zeigen. Eine solche Zusammensetzung zeigt Fig. 49, aus

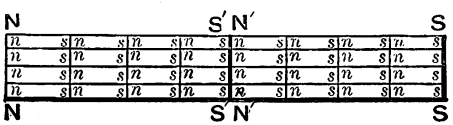

Fig. 49.

welcher hervorgeht, dass, wenn der Magnet an irgend einer Stelle zerbrochen wird, die eine Seite der Bruchfläche nur N-Pole, die andre nur S-Pole zeigt. Dies ist richtig, gleichviel wie klein die einzelnen Teilchen sind. — Wenn der innere Magnetismus des Stahls an jeder Stelle eines Magnets gleich gross wäre, so würden sich die freien Pole nur an den Enden finden. Umgekehrt aber können wir schliessen: der Umstand, dass der freie Magnetismus nicht nur an den Enden ist, sondern von den Enden nach der Mitte zu abnimmt, lässt erkennen, dass die Intensität des innern Magnetismus an den Enden und in ihrer Nähe geringer sein muss als in der Mitte des Stabes.

107. Lamellen-Verteilung des Magnetismus; magnetische Schalen. Bis jetzt haben wir nur die gewöhnliche Verteilung des Magnetismus in einem Stabe betrachtet. Aber es ist möglich, den Magnetismus auf einer dünnen Platte derart zu verteilen, dass die ganze Vorderfläche derselben nur die

Digitized by Google

eine Art Magnetismus und die ganze Hinterfläche nur die andre Art Magnetismus hat. Wenn eine sehr grosse Zahl kleiner Magnete neben einander gestellt würden, etwa wie die Zellen in einer Honigscheibe, alle nordsuchenden Pole nach oben und alle südsuchenden Pole nach unten gerichtet, so würde die ganze eine Seite der Platte ein grosser ebener nordsuchender Pol sein und die andre Seite ein südsuchender Pol. Eine derartige Verteilung über eine Fläche oder Scheibe heisst eine **Lamellen**-Verteilung, zum Unterschiede von der gewöhnlichen Verteilung längs einer Linie oder eines Stabes, welche die **Solenoid**-Verteilung genannt wird. Ein lamellar magnetisierter Magnet wird bisweilen eine **magnetische Schale** genannt. Die Eigenschaften magnetischer *Schalen* sind äusserst wichtig wegen ihrer Analogie mit denjenigen der geschlossenen Volta'schen Ströme.

108. Magnetische Figuren. Gilbert zeigte [1]), dass, wenn ein Blatt Papier oder eine Karte über einen Magnet gehalten wird und Eisenfeilspähne über das Papier gestreut werden, sich dieselben in krummen Linien festsetzen, welche eine *magnetische Figur* bilden, deren allgemeine Form Fig. 50 zeigt. Die Spähne müssen fein sein und durch Musselin gesiebt werden; und um ihr Festsetzen in den Linien zu erleichtern, muss man das Blatt Papier einmal leise anstossen. Die so erhaltenen Figuren können auf verschiedene Weise dauernd fixiert werden. Am besten thut man, wenn man statt des Blattes Papier eine Glasplatte nimmt und dieselbe vorher gummiert und trocken werden lässt. Nachdem man sie über den Magnet gelegt hat, siebt man die Spähne gleichförmig auf die Oberfläche und führt einen leisen Stoss gegen das Glas. Dann lässt man einen Dampfstrahl vorsichtig über die Platte streichen, welcher die Oberfläche des Gummis erweicht, und dieser befestigt beim Erhärten die Spähne an ihren Plätzen. Die Ansicht der Figur zeigt, dass die Linien fast strahlenförmig von jedem Pole auslaufen

1) Die magnetischen Figuren waren dem Lucretius bekannt.

Digitized by Google

und sich im Bogen denen des andern Pols nähern. Faraday, der diese Methode vielfach dazu verwandte, um die Verteilung

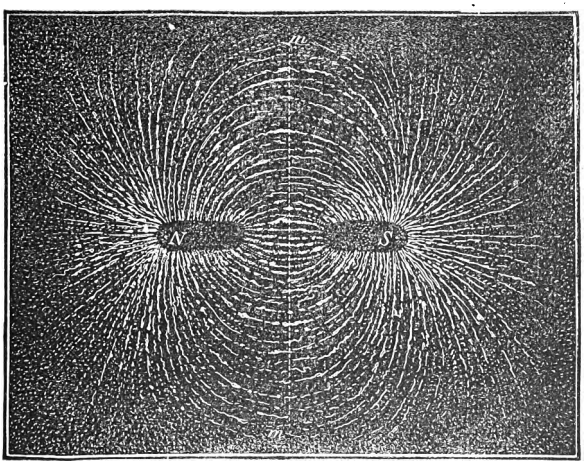

Fig. 50.

des Magnetismus in verschiedenen Feldern zu untersuchen, gab den Linien den Namen **Kraftlinien.** Wie aus der Einwirkung auf kleine magnetische Teilchen hervorgeht, welche sich, den Anziehungen und Abstossungen im Felde folgend, in den Figuren anordnen, stellen diese Linien die Richtung der resultierenden Kraft in jedem Punkte dar; denn jedes Teilchen strebt die Richtung derjenigen magnetischen Induktion anzunehmen, welche aus der gleichzeitigen Wirkung beider Pole hervorgeht; daher kann man sagen, jene Linien stellen die *Linien der magnetischen Induktion* dar [1]). Faraday wies nach, dass diese Kraftlinien ein Bild des magnetischen Feldes geben, indem sie durch ihre Lage die Richtung der magnetischen Kraft und durch ihre Zahl die Intensität derselben angeben. Wenn man sich einen kleinen

1) Oder vielmehr die nach der Ebene der Figur genommene Komponente der magnetischen Induktion; was nicht ganz dasselbe ist, denn oberhalb der Pole stehen die Spähne fast senkrecht zu dieser Ebene.

Digitized by Google

nordsuchenden Pol allein verschaffen und ihn auf irgend eine dieser Kraftlinien legen könnte, so würde er bestrebt sein, sich längs jener Linie von Norden nach Süden zu bewegen; ein einzelner südsuchender Pol würde längs jener Linie sich in entgegengesetzter Richtung zu bewegen streben. Faraday schrieb diesen Kraftlinien auch gewisse physikalische Eigenschaften zu (welche jedoch nur in übertragener Bedeutung richtig sind), nämlich, dass sie sich zwischen ihren Enden zu verkürzen bestrebt sind, und dass sie einander abstossen, wenn sie neben einander liegen. Die neuere Anschauungsweise, welche daran festhält, dass der Magnetismus von gewissen Eigenschaften des Aethers im Raume herrührt, begnügt sich damit, zu sagen, dass in jedem magnetischen Felde sich gewisse Kräfte finden, welche eine Spannung längs der Kraftlinien und einen Druck senkrecht gegen dieselben hervorbringen.

109. Die vorstehend beschriebene Methode kann man dazu benutzen, um sich von dem Vorhandensein *von Folgepunkten* in einem Stahlstabe zu überzeugen, da die in diesem Falle erhaltene Figur der in Fig. 51 gleichen muss. Solcher Zustand

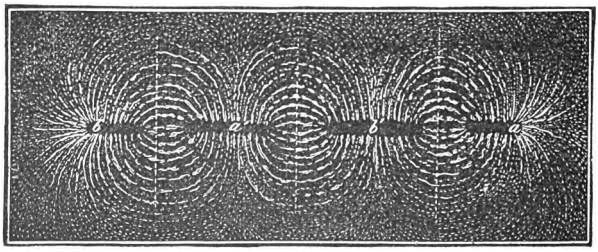

Fig. 51.

kommt zum Vorschein, wenn ein Stück sehr harten Stahls absichtlich unregelmässig magnetisiert wird, indem man es an gewissen Stellen mit starken Magneten berührt. Ein auf diese Weise magnetisierter Stahl besteht in Rücksicht auf seine Kraftäusserungen aus mehreren Magneten, die mit ihren Enden zusammengelegt sind, aber in umgekehrter Richtung, N-S, S-N etc.

Digitized by Google

110. Die Kräfte, welche zwischen ungleichen Polen Anziehung und zwischen gleichen Polen Abstossung hervorbringen, werden durch die magnetischen Figuren, welche sich in den Feldern zwischen den Polen in beiden Fällen ergeben, prächtig zur Anschauung gebracht. (Fig. 52 und 53.) In Fig. 52 sind die Pole

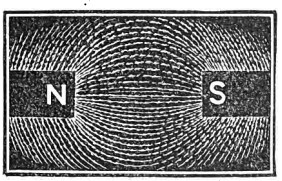

Fig. 52.

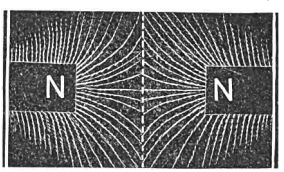

Fig. 53.

entgegengesetzt und die Kraftlinien gehen im Bogen von einem Pole zum andern; während in Fig. 53, welche die Wirkung zweier gleichen Pole darstellt, die Kraftlinien sich so krümmen, als ob sie sich gegenseitig abstiessen, und sich rechtwinklig zur Seite wenden. Musschenbroek war der erste, welcher auf den wesentlichen Unterschied zwischen diesen beiden Figuren aufmerksam machte.

111. **Magnetische Schrift.** Eine andere Art der magnetischen Figuren entdeckte De Haldat, welcher mit dem Pole eines Magnets auf einer dünnen Stahlplatte (z. B. auf einem Sägeblatte) schrieb und dann Eisenfeilspähne darüber streute. Die Schrift, welche an sich völlig unsichtbar ist, offenbart sich in den Linien von Eisenfeilspähnen, welche an den magnetisierten Stellen haften. Diese magische Schrift bleibt in einer Stahlplatte mehrere Monate lang bestehen. Der Verfasser dieser Vorlesungen hat ähnliche Figuren in Eisenfeilspähnen gebildet, indem er mit den Drähten einer kräftigen Volta'schen Batterie auf einer Stahlplatte schrieb.

112. **Magnetisierung der Oberfläche.** In vielen Fällen ist der den Magneten mitgeteilte Magnetismus hauptsächlich auf die äusseren Schichten des Stahls beschränkt. Wenn ein Stahlmagnet in eine Säure gelegt wird, so dass die äusseren Schichten aufgelöst werden, so ergibt sich, dass derselbe seinen Magne-

Digitized by Google

tismus schon verloren hat, wenn nur ein dünner Ueberzug auf diese Weise entfernt worden ist. Magnete, welche sehr vollständig magnetisiert wurden, zeigen jedoch auch im Innern einigen Magnetismus. Eine hohle magnetisierte Stahlröhre ist fast ein ebenso starker Magnet, wie ein solider Stab von derselben Grösse. Wenn ein Bündel Stahlplatten magnetisiert wird, während dieselben zusammengebunden sind, so stellt sich heraus, dass nur die äusseren Platten stark magnetisiert sind. Die inneren zeigen sogar bisweilen eine entgegengesetzte Magnetisierung.

113. Mechanische Wirkungen des Magnetisierens. Wenn ein Stab aus Stahl oder Eisen kräftig magnetisiert wird, so wird er etwas länger als vorher; und da sein Volumen dasselbe ist, wie vorher, so zieht er sich zugleich in der Dicke zusammen. Joule fand, dass ein eiserner Stab, der bis zu seinem Maximum magnetisiert wurde, um $\frac{1}{12000}$ seiner Länge zunahm. Diese Erscheinung, glaubt man, rührt von der Magnetisierung der einzelnen Teilchen her, welche nach der Magnetisierung sich parallel der Länge des Stabes zu ordnen streben. Diese Annahme wird bestätigt durch die Beobachtung von Page, dass man in dem Augenblicke, wo ein Stab magnetisiert oder entmagnetisiert wird, ein schwaches metallisches Klingen in dem Stabe hört.

W. Grove zeigte an einem Quantum Wasser, welches er in eine Röhre gegossen und dann getrübt hatte, indem er fein gestossenes magnetisches Eisenoxyd darin aufrührte, dass die Flüssigkeit sich beim Magnetisieren der Röhre in der Richtung des Magnetisierens aufklärte, indem die Teilchen sich offenbar ihrer Länge nach, Ende an Ende an einander lagerten und mehr Licht zwischen sich hindurch liessen. Ein tordierter Eisendraht strebt, wenn er magnetisiert wird, in seine Ruhelage zurückzukehren, sich zu detordieren. Wird ein Stück Eisen in rascher Aufeinanderfolge kräftig magnetisiert und entmagnetisiert, so wird dasselbe warm, als ob das Magnetisieren von innerer Reibung begleitet wäre.

Digitized by Google

114. Wirkung des Magnetismus auf das Licht. Faraday entdeckte, dass ein polarisierter Lichtstrahl bei seinem Durchgange durch gewisse Körper in einem kräftigen magnetischen Felde die Richtung seiner Schwingungen ändert. Diese Erscheinung, welche bisweilen die Magnetisierung des Lichtes genannt wird, wird besser als die Drehung der optischen Polarisationsebene durch Magnetismus bezeichnet. Die Grösse der Drehung ist je nach den Medien verschieden, und ändert sich mit der magnetisierenden Kraft. Kürzlich hat Kerr gezeigt, dass durch Reflexion am Ende oder an der Seite eines kräftigen Magnets die Polarisationsebene des polarisierten Lichtes ebenfalls gedreht wird. Weitere Erwähnung finden diese Entdeckungen in dem Kapitel über Elektrooptik, Vorlesung 35.

115. Physikalische Theorie des Magnetismus. Alle diese verschiedenen Erscheinungen deuten auf eine Theorie des Magnetismus, welche sehr von der alten Vorstellung der Fluida abweicht. Es scheint, dass jedes Molekül eines Magnets selbst wieder ein Magnet ist, und dass der Magnet nur dadurch als ein Ganzes zu einem Magnet wird, dass die Moleküle sich so drehen, dass sie alle nach derselben Richtung zeigen. Diese Schlussfolge wird durch die Beobachtung unterstützt, dass, wenn man eine mit Eisenfeilspähnen gefüllte Glasröhre magnetisiert, man sehen kann, wie sich die Eisenfeilspähne mit ihren Längsaxen einander parallel und parallel der Längsaxe der Glasröhre stellen, und dass sie, nachdem sie sich einmal so gestellt haben, wie ein Magnet wirken, bis sie wieder geschüttelt werden. Es scheint schwieriger zu sein, die einzelnen Moleküle von festem Stahl so zu richten, dass alle ihre Längsaxen nach derselben Richtung zeigen; aber, nachdem sie so gerichtet sind, bleiben sie auch stehen, wenn sie nicht kräftig geschlagen oder erhitzt werden. Aus dieser Theorie geht hervor, dass die Grenze der möglichen Magnetisierung erreicht wäre, wenn alle Moleküle sich mit ihren Längsaxen parallel gestellt hätten. Einige sorgfältige Versuche von Beetz mit durch Elektrolyse ausgeschiedenem Eisen bestätigen diesen Schluss vollkommen, und verleihen der Theorie mehr Ansehen. Die optischen Erscheinungen führten Maxwell zu dem weiteren Schlusse, dass diese longitudinal-geordneten Moleküle um ihre Längsachsen rotieren, und dass im Aether des Raumes ebenfalls eine drehende Bewegung längs der Linien der magnetischen Induktion stattfindet; da diese Bewegung, wenn sie in einem vollkommenen Medium vor sich geht (und als solches kann der Aether betrachtet werden) Spannungen längs der Linien und Drucke rechtwinklig gegen sie erzeugt, so würde dieselbe eine zufriedenstellende Erklärung der magnetischen Anziehungen und Abstossungen an die Hand geben, welche offenbar durch den leeren Raum hindurch wirken. Hughes hat kürzlich gezeigt, dass der Magnetismus des Eisens und Stahls mit der molekularen Festigkeit des Materials in engem Zusammenhange steht. Seine Untersuchungen mit der Induktions-Waage (Art. 438) und der magnetischen Waage

Digitized by Google

(Art. 439) wollen nachweisen, dass jedes Molekül eines magnetischen Metalls eine absolut konstante besondere magnetische Polarität hat; und dass, wenn ein Stück Eisen oder Stahl scheinbar neutral ist, seine Moleküle innerlich so geordnet sind, dass sie ihre Polarität gegenseitig aufheben, indem sie geschlossene magnetische Ströme unter sich bilden. Nach dieser Anschauungsweise besteht das Magnetisieren eines Stücks Eisen in weiter nichts, als die Moleküle in neuen und symmetrischen Lagen rotieren zu lassen.

XI. VORLESUNG: *Gesetze der magnetischen Kraft.*

116. Gesetze der magnetischen Kraft.

Erstes Gesetz: *Gleichnamige magnetische Pole stossen sich ab, ungleichnamige magnetische Pole ziehen sich an.*

Zweites Gesetz: *Die Kraft, welche zwei magnetische Pole auf einander ausüben, ist dem Produkte ihrer Intensitäten proportional und dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional.*

117. Das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis. Das zweite der obigen Gesetze ist allgemein als das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis bekannt. Das analoge Gesetz der elektrischen Anziehung wurde bereits erklärt und erläutert (Art. 16). Dies Gesetz erklärt eine in einer früheren Vorlesung, Art. 77, erwähnte Thatsache, dass kleine Eisenstücke wirklich von einem Magnetpole angezogen werden. Wenn man ein kleines Stück Eisendraht *a b* (Fig. 54) an einem Faden aufhängt und ihm den nordsuchenden Pol eines Magnets nähert, so wird das Eisen durch Induktion magnetisiert; dasselbe dreht sich und zeigt nach dem Magnetpole, indem es sich so nahe als möglich längs einer Kraftlinie stellt und sein nahes Ende *b* ein südsuchender, sein entferntes Ende *a* ein nordsuchender Pol wird. Nun wird der Pol *b* angezogen und der Pol *a* abgestossen. Aber diese beiden Kräfte sind einander nicht gleich, da die Ent-

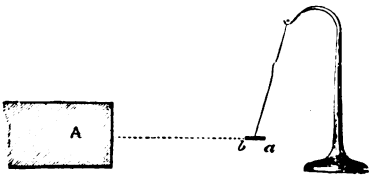

Fig. 54.

Digitized by Google

fernungen ungleich sind. Die Abstossung ist nach dem Gesetze vom umgekehrten quadratischen Verhältnis proportional $\left(\frac{1}{A\,a}\right)^2$ und die Anziehung proportional $\left(\frac{1}{A\,b}\right)^2$; deshalb steht das Eisenstück $a\ b$ unter dem Einflusse eines Kräftepaars, welches demselben eine bestimmte Richtung gibt, und auch unter dem Einflusse einer Resultierenden, welche es nach A zieht. Nur solche Körper werden von Magneten angezogen, in denen der Magnetismus auf solche Weise induziert werden kann; und sie werden nur wegen des in ihnen induzierten Magnetismus angezogen.

Wir erwähnten, Art. 83, dass auf eine Magnetnadel, welche auf einem Stück Kork frei auf der Oberfläche einer Flüssigkeit schwimmt, Kräfte wirken, welche ihr eine bestimmte Richtung geben, dass jedoch dieselbe nicht wie im vorigen Falle, sich als Ganzes nach Norden oder Süden zu bewegen strebt. Die Nadel erleidet eine Drehung, weil die Anziehung und Abstossung der magnetischen Pole der Erde in einer gewissen Richtung wirken; da aber die magnetischen Pole der Erde sich in einem ungeheuer grossen Abstande befinden im Vergleich zur Länge der schwimmenden Magnetnadel, so dürfen wir sagen, dass für alle praktischen Zwecke die Pole der Magnetnadel vom Nordpol der Erde gleich weit entfernt sind. Die anziehende Kraft welche auf den nordsuchenden Pol der Nadel wirkt, ist deshalb für alle Fälle der Praxis nicht grösser, als die abstossende Kraft, welche auf den südsuchenden Pol ausgeübt wird. Daher erleidet die schwimmende Nadel als Ganzes keine fortschreitende Bewegung.

118. Messung der magnetischen Kräfte. Die Richtigkeit des Gesetzes vom umgekehrten quadratischen Verhältnis lässt sich dadurch nachweisen, dass man die Anziehung zwischen zwei Magnetpolen in bekannten Abständen misst. Dies setzt jedoch voraus, dass wir ein Mittel haben, die Grösse der magnetischen Kräfte der Anziehung und Abstossung genau zu messen. Die magnetische Kraft kann nach einer der 4 folgenden Methoden

Digitized by Google

gemessen werden: 1) indem man derselben durch die Torsion eines elastischen Fadens das Gleichgewicht hält; 2) indem man die Schwingungszeit einer Magnetnadel beobachtet, welche unter dem Einflusse der Kraft Schwingungen macht; 3) indem man die Ablenkung beobachtet, welche sie auf eine Magnetnadel hervorbringt, die bereits durch eine Kraft von bekannter Intensität abgelenkt ist; 4) indem man ihr durch die Schwerkraft das Gleichgewicht hält, welche hier in der Weise benutzt wird, dass man versucht, einen an 2 parallelen Fäden aufgehängten Magnet (oder einen *bifilar* aufgehängten Magnet) abzulenken, denn diese Fäden können nur dadurch aus ihrer parallelen Lage entfernt werden, dass der Schwerpunkt des Magnets höher zu liegen kommt. Die ersten 3 dieser Methoden müssen ausführlich erklärt werden.

119. Die Torsionswaage. Coulomb gebrauchte die

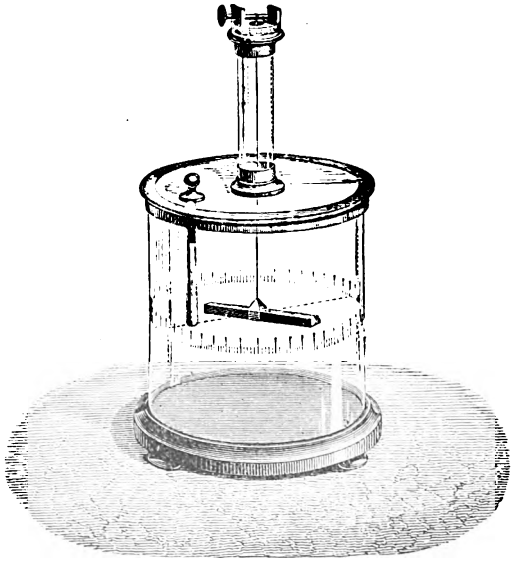

Fig. 55.

Torsionswaage auch zur Messung magnetischer Kräfte. Die wesentlichsten Bestandteile dieses Apparates (wie derselbe zur

Digitized by Google

Messung der elektrischen Abstossung dient) wurden auf Seite 15 beschrieben. Fig. 55 zeigt, wie derselbe zur Messung der magnetischen Abstossung eingerichtet ist. Mit Hilfe der Torsionswaage können wir das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis nachweisen. Auch können wir, wenn wir dies Gesetz als richtig voraussetzen, die Torsionswaage dazu gebrauchen, um die Stärke von Magnetpolen zu messen, indem wir die Kräfte, welche sie in bekannten Entfernungen ausüben, messen. Um das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis zu beweisen, stellte Coulomb folgenden Versuch an: Der Apparat wurde zunächst so eingestellt, dass eine in einer Kupferhülse an einem dünnen Silberdrahte aufgehängte Magnetnadel sich im magnetischen Meridian befand, ohne dass der Draht tordiert war. Dies bewerkstelligte er dadurch, dass er zuerst den Magnet in die Hülse legte und den Apparat annähernd einstellte, dann den Magnet durch einen gleich schweren Kupferstab ersetzte und den Apparat abermals einstellte, indem er auf diese Weise den Fehler durch wiederholte Versuche verringerte. Hierauf hatte er zu untersuchen, um wie viel Grad er die Torsionsscheibe am obern Ende des Fadens zu drehen hatte, damit die Nadel um 1 Grad aus dem magnetischen Meridian entfernt würde. Es stellte sich dabei heraus, dass auf 35^0 Drehung 1^0 Ablenkung des Magnets kam. Darauf brachte er einen zweiten Magnet derart in den Apparat, dass derjenige Pol desselben, welcher den Pol der aufgehängten Nadel abstiess, nach unten gerichtet war. Er fand, dass der Pol der Nadel um 24 Grad abgestossen wurde. Durch den vorhergehenden Versuch wissen wir, dass dieser abstossenden Kraft 24×35^0 der Torsionsscheibe entsprechen, und hierzu müssen wir noch die Tordierung des Drahtes, d. h. 24^0, hinzufügen, so dass wir im Ganzen 864^0 haben, was wir das »Torsionsäquivalent« der abstossenden Kraft nennen wollen, für den Fall, wo die Pole um 24^0 von einander entfernt sind. Schliesslich wurde die Torsionsscheibe so gedreht, dass der aufgehängte Magnet dem festen Pole näher gebracht wurde, so lange, bis der Abstand zwischen den sich abstossenden Polen nur noch

Digitized by Google

halb so gross wie anfänglich war. Es ergab sich, dass die Torsionsscheibe 8 volle Umdrehungen machen musste, damit die Pole einen Abstand von 12° hatten. Diese 8 Umdrehungen betragen $8 \times 360^{\circ} = 2880^{\circ}$. Allein das untere Ende des Fadens war ausserdem noch im Vergleich zum obern Ende um 12° gedreht; die diese Drehung erzeugende Kraft entspricht daher einer Torsion von $12 \times 35^{\circ} = 420^{\circ}$; hierzu muss noch die wirkliche Drehung von 12° hinzugefügt werden, so dass sich im Ganzen $2880^{\circ} + 420^{\circ} + 12^{\circ} = 3312^{\circ}$ ergeben. Hieraus ergibt sich, dass, wenn man den Abstand der Magnetpole um die Hälfte verkleinert, die Kraft *vier mal* so gross wird, denn 3312 ist fast genau das vierfache von 864. Hätte man den Abstand der Pole auf den dritten Teil reduziert, so würde die Kraft 9mal so gross gewesen sein.

120. Methode der Schwingungen [1]). Wenn wir einen Magnet, welcher an einem Faden aufgehängt ist oder auf einer Spitze balanciert, aus seiner Ruhelage bringen, so schwingt derselbe hin und her, und zwar so, dass die Schwingungen in *fast genau gleichen* Zeiten ausgeführt werden, obgleich die Amplitude (Schwingungsbogen) derselben allmählich abnimmt. In der That folgen sie einem ähnlichen Gesetze, wie die Schwingungen eines Pendels, welches unter dem Einflusse der Schwerkraft schwingt. Das Gesetz der Pendelschwingungen heisst: *Das Quadrat der Zahl der in einer gewissen Zeit ausgeführten Schwingungen ist der Kraft proportional.* Folglich können wir magnetische Kräfte dadurch messen, dass wir die in einer Minute von einem Magnet gemachten Schwingungen zählen. Dabei darf man jedoch nicht vergessen, dass die wirkliche Anzahl der von einem gegebenen Magnet gemachten Schwingungen sowohl von dem

1) Man kann auch *elektrische* Kräfte durch eine »Methode der Schwingungen« messen; indem man eine kleine geladene Kugel, welche an dem einen Ende eines horizontal aufgehängten Stabes befestigt ist, unter der Einwirkung der anziehenden Kraft eines in ihrer Nähe befindlichen, geladenen Konduktors schwingen lässt, dessen »Kraft« in dieser Entfernung dem Quadrate der Schwingungen während einer gegebenen Zeit proportional ist.

Digitized by Google

Gewichte, der Länge und der Gestalt des Magnets, als auch von der Stärke seiner Pole und dem »Magnetfelde«, in welchem er sich befindet, abhängt.

121. Wir können diese Methode dazu benutzen, um die Intensitäten des Erdmagnetismus [1]) an zwei verschiedenen Orten mit einander zu vergleichen, indem man denselben Magnet an beiden Orten schwingen lässt. Wenn derselbe am ersten Orte a Schwingungen in der Minute macht, und am zweiten Orte b Schwingungen in der Minute, so verhalten sich die magnetischen Kräfte beider Orte wie $a^2 : b^2$.

Ferner können wir die Methode dazu benutzen, um die Kraft, welche ein Magnet in der Nähe eines Ortes ausübt, mit der Kraft des Erdmagnetismus dieses Ortes zu vergleichen. Denn wenn wir eine kleine Magnetnadel irgendwo schwingen lassen, und wir finden, dass dieselbe unter der vereinten Einwirkung [2]) des Erdmagnetismus und des benachbarten Magnets m Schwingungen in der Minute macht, n Schwingungen dagegen nach Entfernung des Magnets unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus, so ist m^2 den vereinten Kräften proportional, n^2 dagegen der vom Erdmagnetismus herrührenden Kraft, und die Differenz $m^2 - n^2$ ist der von dem benachbarten Magnet herrührenden Kraft proportional.

122. Wir wollen jetzt die Methode der Schwingungen anwenden, um die relativen Mengen von freiem Magnetismus in den verschiedenen Punkten eines Stabmagnets zu messen. Der zu prüfende Magnet wird aufrecht gestellt (Fig. 56). Ein kleiner Magnet, welcher horizontal schwingen kann, wird in seine Nähe gebracht und in geringem Abstande von seinem Ende aufgehängt, und dann in Schwingung versetzt, wobei die Schwingungen während einer bestimmten Zeit gezählt werden.

1) oder genauer der *horizontalen Komponente* des Erdmagnetismus.

2) Wir nehmen in diesem Falle an, dass der Magnet so aufgestellt ist, dass seine Kraft mit der des Erdmagnetismus jenes Ortes gleiche Richtung hat, und dass der andere Pol des Magnets so weit entfernt ist, dass er auf die schwingende Nadel keinen Einfluss mehr ausübt.

Digitized by Google

Nehmen wir an, dass die Nadel unter dem Einflusse des Erdmagnetismus allein 3 volle Schwingungen in der Minute ausführen würde, dagegen 14, wenn sie in der Nähe des Poles des vertikalen Magnets schwingt, so ist die Kraft des letztern der Differenz $14^2 - 3^2 = 196 - 9 = 187$ proportional. Hierauf wollen wir die schwingende Nadel in demselben Abstande einer etwas tiefer gelegenen Stelle des Magnets gegenüber aufhängen. Schwingt sie hier 12 mal in der Minute, so wissen wir, dass die Kraft der Differenz $12^2 - 3^2 = 144 - 9 = 135$ proportional ist. Auf diese Weise finden wir, dass mit abnehmender Kraft auch die Zahl der Schwingungen kleiner wird, und dass, wenn wir die Nadel der Mitte des vertikalen Magnets gegenüber aufhängen, erstere nur noch 3 mal in der Minute schwingt, oder dass die erdmagnetische Kraft die einzige Kraft ist, welche auf die Schwingungen der Nadel von Einfluss ist. In Fig. 57 haben

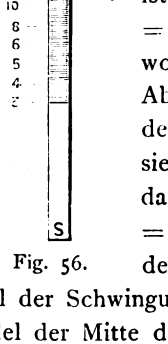

Fig. 56.

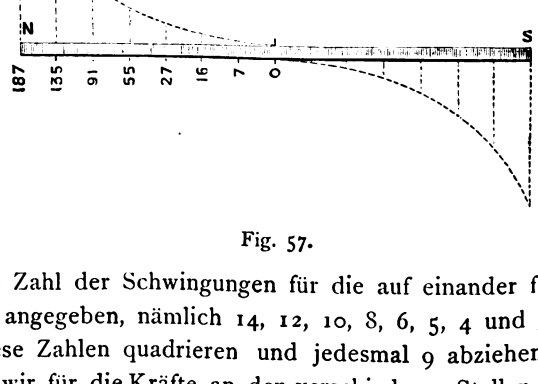

Fig. 57.

wir die Zahl der Schwingungen für die auf einander folgenden Stellen angegeben, nämlich 14, 12, 10, 8, 6, 5, 4 und 3. Wenn wir diese Zahlen quadrieren und jedesmal 9 abziehen, so erhalten wir für die Kräfte an den verschiedenen Stellen folgende Zahlen: 187, 135, 91, 55, 27, 16, 7 und 0. Von diesen Kräften

Digitized by Google

können wir sagen, dass sie die Stärke des freien Magnetismus an den verschiedenen Stellen darstellen, und es ist zweckmässig, dieselben graphisch darzustellen nach Art der Fig. 57, wo die Längen der punktierten Linien das Verhältnis der Kräfte darstellen sollen. Die Kurve, welche die Endpunkte dieser »Ordinaten« verbindet, zeigt graphisch, wie die Kraft, welche am Ende am grössten ist, nach der Mitte zu abnimmt. Auf einen entfernten Magnetpol würden diese durch das krummlinige Dreieck dargestellten Kräfte so wirken, als wenn sie in einem Punkte des Magnets vereinigt wären, welcher dem »Schwerpunkte« dieses Dreiecks gegenüber liegt; oder mit andern Worten der »Pol«, welcher der Mittelpunkt der resultierenden Kräfte ist, liegt nicht am Ende des Magnets. In dünnen Stäben aus magnetisiertem Stahl liegt er ungefähr um den zehnten Teil der Magnetlänge vom Ende entfernt.

123. Methode der Ablenkungen. Es gibt mehrere Methoden, bei denen die Ablenkung eines Magnets durch einen zweiten Magnet benutzt werden kann, um magnetische Kräfte zu messen. Wir können hier nur eine Uebersicht der wichtigsten Grundsätze geben. Wenn zwei gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte auf die Enden eines unbiegsamen Stabes wirken, so streben sie denselben zu drehen. Solche 2 Kräfte nennt man ein »Kräftepaar«, und ihre Wirkung oder das »Moment« des Kräftepaares erhält man, wenn man eine der beiden Kräfte mit dem senkrechten Abstande der Richtungen der Kräfte multipliziert. Ein solches Kräftepaar strebt eine drehende, aber keine fortschreitende Bewegung zu erzeugen. Nun wirkt auf eine Magnetnadel, welche sich in einem magnetischen Felde in schräger Stellung zu den Kraftlinien befindet, ein »Kräftepaar«, welches bestrebt ist, sie in den magnetischen Meridian zu drehen, denn der nordsuchende und der südsuchende Pol werden nach Norden, resp. Süden durch 2 gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte getrieben. Die auf jeden Pol wirkende Kraft ist das Produkt aus der Polstärke und der Intensität des »Feldes«, d. h. der horizontalen Komponente der

Digitized by Google

erdmagnetischen Kraft des Ortes. Wir wollen die Stärke des nordsuchenden Pols m nennen, und das Zeichen H gebrauchen, um die in horizontaler Richtung vom Erdmagnetismus ausgeübte Kraft darzustellen. (Der Wert von H ist an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche verschieden.) Die auf den Pol A ausgeübte Kraft (Fig. 58) ist dann $m \times H = mH$ und die auf den Pol B ausgeübte, ist ebenso gross und entgegengesetzt gerichtet. Wir nehmen NS als die Richtung des magnetischen Meridians, so dass die Kräfte dieser Richtung parallel wirken. Nun bildet die Nadel AB einen Winkel mit dem Meridian NS, und die magnetische Kraft wirkt auf A in der Richtung der Linie PA und auf B in der Richtung QB, wie durch die Pfeile angedeutet ist. PQ ist der senkrechte Abstand der beiden Kräfte; daher erhält man das »Moment« des Kräftepaares, indem man die Länge PQ mit der auf einen der Pole ausgeübten Kraft multipliziert. Bezeichnet man das Moment des Kräftepaares mit G, so ergibt sich:

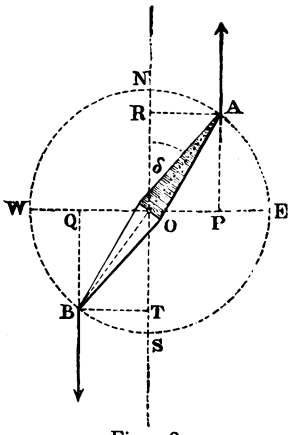

Fig. 58.

$$G = PQ \times m \,.\, H.$$

PQ ist aber gleich der Länge des Magnets, multipliziert mit dem Sinus [1]) des Winkels AOR, dem Ablenkungswinkel, den wir δ nennen wollen. Bezeichnet man also den Abstand der beiden Pole mit l, so erhalten wir für das Moment des Kräftepaares:

$$G = m\,l\,H \,.\, \sin\delta.$$

In Worten: Das »Moment des Kräftepaares«, welches auf die Nadel wirkt, ist ihrem »magnetischen Moment« $(m \times l)$, der

1) Wer mit trigonometrischen Ausdrücken nicht bekannt ist, lese die Anmerkung am Schluss dieser Vorlesung: Ueber Methoden, Winkel zu berechnen.

Digitized by Google

horizontalen Kraft des Erdmagnetismus H, und dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional. — Der Leser wird bemerkt haben, dass der Abstand PQ um so grösser ist, je weiter die Nadel von der Richtung NS sich entfernt, und dass derselbe am grössten ist, wenn die Nadel die Richtung EW, d. h. von Westen nach Osten angenommen hat. Ebenso ist das »Moment« des Kräftepaares, welches den Magnet zu drehen strebt, um so kleiner, je mehr die Nadel in die Richtung NS gelangt.

124. Wir wollen jetzt annehmen, dass die Ablenkung δ durch eine magnetische Kraft bewirkt ist, welche rechtwinklig zum magnetischen Meridian wirkt, und den Pol A in der Richtung RA zu bewegen strebt. Die Länge der Linie RT, multipliziert mit der neuen Kraft, ist dann das Moment des neuen Kräftepaares, welches den Magnet in die Richtung EW zu drehen strebt. Wenn dann die Nadel unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte zur Ruhe gekommen ist, so ist klar, dass die beiden entgegengesetzten Drehungsmomente genau gleich sind, oder dass das Moment des einen Kräftepaares gleich dem Momente des andern Kräftepaares ist. Daher verhält sich die Kraft, welche in der Richtung WE wirkt, zu der Kraft, welche in der Richtung NS wirkt, wie PQ zu RT oder wie PO zu RO. Nennen wir diese Kraft f, so ist

$$f : H = PO : RO$$

$$\text{oder} \qquad f = H \cdot \frac{PO}{RO}$$

PO ist aber gleich AR, und $\frac{AR}{RO} = \text{tang } \delta$, daher

$$f = H \,.\, \text{tang } \delta$$

oder mit andern Worten: *die magnetische Kraft, welche rechtwinklig zum Meridian wirkt und einer Magnetnadel die Ablenkung δ erteilt, ist gleich der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus an jenem Orte, multipliziert mit dem Tangens des Ablenkungswinkels.* Daraus folgt noch, dass zwei verschiedene magnetische Kräfte, welche rechtwinklig zum Meridian wirken, die Nadel einzeln um Winkel ablenken, *deren Tangenten den Kräften proportional*

Digitized by Google

sind. Dieser höchst wichtige Satz wird bei der Konstruktion gewisser Galvanometer benutzt (vergl. Art. 199).

Den Namen **Magnetometer** gibt man jedem Magneten, welcher speziell dazu eingerichtet ist, um magnetische Kräfte durch die Ablenkungen, welche sie hervorbringen, zu messen. Die Methoden, die *absoluten* Werte magnetischer Kräfte in *Kilogrammetern* oder andern abstrakten Krafteinheiten zu ermitteln, sollen in der Anmerkung am Schlusse der 25. Vorlesung erklärt werden.

125. Einheit der Polstärke. Wir fanden in Coulomb's Torsionswaage ein bequemes Mittel, die Polstärken verschiedener Magnete mit einander zu vergleichen; denn die von einem Pole ausgeübte Kraft ist der Polstärke proportional. Das zweite magnetische Kraftgesetz (vergl. Art. 116) setzte fest, dass die zwischen 2 Polen ausgeübte Kraft dem Produkte ihrer Polstärken direkt proportional und dem Quadrate ihres Abstandes umgekehrt proportional ist. Nun kann man die Einheit der Polstärke aber so wählen, dass die Kraft nicht nur proportional, sondern gleich dem Produkte der Polstärken dividiert durch das Quadrat der Entfernungen wird.

Zu dem Zwecke stellen wir die folgende Definition für Einheit der Polstärke oder magnetische Poleinheit auf: *Ein magnetischer Pol Eins ist ein solcher, welcher einen gleichartigen Pol von derselben Stärke im Abstande von 1 Zentimeter mit einer Kraft von einem Dyn abstösst* (vergl. Art. 255). Lassen wir diese Definition gelten, so können wir das zweite magnetische Kraftgesetz folgendermassen ausdrücken:

$$f = \frac{m \times m'}{d^2};$$

hierin bedeuten f die Kraft (in Dynes), m und m' die beiden Polstärken und d den Abstand der Pole (in Zentimetern). Diesen Gegenstand nimmt die 25. Vorlesung, Art. 310 wieder auf, wo die Theorie des magnetischen Potentials behandelt wird.

126. Theorie der magnetischen Kurven. Wir sahen im Art. 108, dass man magnetische Figuren durch Eisenfeilspähne erzeugen kann, welche sich innerhalb des Kraftfeldes

Digitized by Google

eines Magnets in gewissen Linien festsetzen. Wir können jetzt mit Hilfe des Gesetzes vom umgekehrten quadratischen Verhältnis die Linien bestimmen, in welchen sich ein Eisenteilchen in irgend einem Punkte des Feldes festsetzt. Es sei NS (Fig. 59) ein langer,

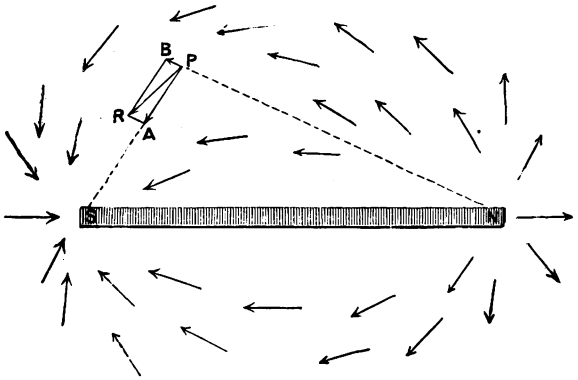

Fig. 59.

dünner Magnet, und P irgend ein Punkt in dem von seinem Magnetismus herrührenden Felde. Befindet sich der nordsuchende Pol eines kleinen Magnets in P, so wird derselbe von S angezogen und von N abgestossen; die Richtungen dieser beiden Kräfte fallen mit den Linien PS und PN zusammen. Die Intensitäten der Kräfte können durch bestimmte auf diesen Linien abgetragene Längen dargestellt werden. Nimmt man an, dass der Abstand PN doppelt so gross ist, wie PS, so ist die abstossende Kraft in der Richtung PN gleich $\frac{1}{4}$ der anziehenden Kraft in der Richtung PS. Deshalb mache man die Kraft PA in der Richtung von P nach A viermal so lang, wie die Kraft PB in der Richtung von N nach P. Dann konstruiere man die Resultierende [1]), nach der bekannten Methode über Zusammensetzung mechanischer Kräfte, indem man die beiden Kräfte PA und PB zu dem Parallelogramm PARB vervollstän-

1) Man vergleiche die Lehre vom Parallelogramm der Kräfte in den Lehrbüchern der Physik.

Digitized by Google

digt; die Diagonale PR gibt alsdann nach Länge und Richtung die resultierende magnetische Kraft im Punkte P an. In der That stellt PR die Linie dar, längs welcher sich ein kleiner Magnet oder ein Eisenteilchen festsetzen würde. Auf dieselbe Weise können wir für jeden Punkt des Feldes die Richtung der Kraftlinien bestimmen. Die kleinen Pfeile in Fig. 59 zeigen, wie die Kraftlinien vom N.-Pole auslaufen und im Bogen zum S.-Pole führen. Man vergleiche diese Figur mit den Linien von Fig. 50.

127. Kraft einer magnetischen Schale (Doppelfläche). Eine magnetische Schale (Art. 107) übt auf einen in einem benachbarten Punkte befindlichen Magnetpol eine magnetische Kraft aus. Ist die Schale eben und sehr gross im Verhältnis zum Abstande des betrachteten Punktes, so ist diese Kraft unabhängig von jenem Abstande, und senkrecht gegen die Schale gerichtet; sie hängt bloss von der magnetischen Masse der Schale ab und ist ihrem numerischen Werte nach gleich 2π, multipliziert mit der magnetischen Masse pro Quadratzentimeter [1]) (d. h. $= 2\pi\sigma$, wo σ die magnetische »Flächendichte« an der Oberfläche der Schale bedeutet.)

Ist jedoch die Schale durch eine Fläche begrenzt, so ist die von ihr auf einen äussern Punkt ausgeübte Kraft grösser in der unmittelbaren Nachbarschaft der Schale als in einem gewissen Abstande von derselben. In diesem Falle ist es sehr vorteilhaft, nicht die *Kraft*, sondern das *Potential* der Schale zu messen. Die Definition des »magnetischen Potentials« findet sich im Art. 310; vorläufig genügt es, wenn wir festsetzen, dass *das Potential einer magnetischen Schale in einem benachbarten Punkte gleich der Stärke der Schale ist, multipliziert mit dem körperlichen Winkel* [2]) *der Schale in jenem Punkte.*

---

1) Der Beweis dieses Satzes ist ebenso wie der am Ende der XX. Vorlesung, für den analogen Satz, betreffend die Kraft, welche eine ebene, mit Elektrizität geladene Scheibe ausübt.

2) Man vergleiche die Anmerkung über die Methoden der Winkelberechnung am Ende dieser Vorlesung.

Digitized by Google

128. Ein magnetisches Paradoxon. Hält man den nordsuchenden Pol eines starken Magnets in einiger Entfernung von dem gleichnamigen Pole eines schwachen Magnets, so stösst er denselben ab. Wird er jedoch ganz dicht an denselben gebracht, so *zieht* er ihn an. Dieser paradoxe Versuch erklärt sich aus dem Umstande, dass der Magnetismus, welchen der kräftige Magnet in dem schwächern induziert, von entgegengesetzter Art ist und deshalb angezogen wird; und falls nur der kräftige Magnet nahe ist, so kann dieser induzierte Magnetismus den ursprünglichen Magnetismus des schwachen Magnets überwinden. Der Leser muss beachten, dass bei den meisten Versuchen mit Magnetpolen ähnliche störende Erscheinungen auftreten. Der Magnetismus eines Magnets ist nicht völlig *fixiert*, sondern seine Verteilung ist in Folge der Nähe anderer Magnetpole Störungen unterworfen; denn kein Stahl ist so hart, als dass er nicht noch vorübergehend durch magnetische Induktion beeinflusst würde. Das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis ist nur dann richtig, wenn der Abstand der Pole so gross ist, dass die Veränderungen ihres Magnetismus in Folge der gegenseitigen Induktion als unbedeutend vernachlässigt werden dürfen.

Anmerkung über die Methoden, ebene und körperliche Winkel zu berechnen.

129. Berechnung in Graden. Wenn zwei gerade Linien sich durchschneiden, so bilden sie einen *Winkel;* diesen Winkel kann man als die Drehung definieren, welche eine der Linien um einen festen Punkt der andern Linie ausgeführt hat. So z. B. kann man sich denken, dass die Linie CP in Fig. 60 anfänglich die Lage CO gehabt hat und darauf in ihre jetzige Lage gedreht wurde. Ihre Drehung um C ist offenbar ein gewisser Bruchteil einer vollen Umdrehung und heisst »der Winkel, welchen PC mit OC bildet« oder einfacher »der Winkel PCO«. Diesen Winkel kann man aber auf verschiedene Weise *messen*. Gewöhnlich wird derselbe in »Bogengraden« berechnet. Um den Punkt C sei ein Kreis beschrieben und seine Peripherie in 360

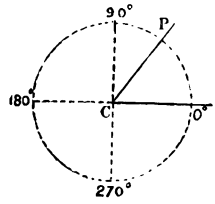

Fig. 60.

Digitized by Google

gleiche Teile geteilt; dann heisst jeder Teil »ein Grad« (1^0) und der Winkel wird gemessen, indem man die Anzahl Grade längs des Kreisbogens OP angibt. In der Figur ist der Bogen ungefähr $57\frac{1}{4}^0$, oder er beträgt $\frac{57\frac{1}{4}}{360}$ einer vollen Umdrehung. Auf die Grösse des Kreises kommt es dabei nicht an.

130. Berechnung in Radien. Eine anschaulichere, jedoch weniger übliche Methode der Winkelmessung besteht darin, denselben durch das Verhältnis des Kreisbogens, auf welchem er »steht«, zu der Länge des Radius dieses Kreises auszudrücken. Ist z. B. der *Radius* des um C beschriebenen Kreises gleich *1* Zentimeter, der *Durchmesser* also gleich *2* Zentimetern, so beträgt die Länge der ganzen Peripherie bekanntlich ungefähr $3\frac{1}{7}$ (genauer 3,14159 ...) mal so viel als der Durchmesser. Zur Abkürzung wird diese Zahl stets mit dem griechischen Buchstaben π bezeichnet. Folglich beträgt die Länge der Peripherie jenes Kreises, dessen Radius = 1 Zentimeter, 6,28318 ... Zentimeter oder 2π Zentimeter. Man kann also einen Winkel berechnen, indem man die Länge des Bogens, auf welchem er steht, an einem Kreise von einem Zentimeter Radius angibt. Ist z. B. der Bogen OP des Winkels PCO gerade 1 Zentimeter lang, so ist dies der Winkel *1*, oder die Winkeleinheit, oder, wie man sich bisweilen ausdrückt, der Winkel PCO ist gleich *einem »Radius«*. Bei der Gradmessung ist ein Radius = $\frac{360^0}{2\pi}$ oder annähernd = $57^0\,17'$. Die ganze Peripherie des Kreises beträgt 2π Radien. Ein rechter Winkel beträgt $\frac{\pi}{2}$ Radien.

131. Berechnung durch den Sinus oder Cosinus. In der Trigonometrie kommen andere Methoden der Winkelberechnung zur Anwendung, wobei jedoch nicht die Winkel selbst, sondern gewisse »Funktionen« derselben, Sinus, Cosinus, Tangens etc. genannt, berechnet werden. Für die mit diesen Funktionen nicht bekannten Leser wollen wir die geometrische Natur derselben kurz auseinandersetzen. Um den Mittelpunkt C (Fig. 61) sei, wie vorher, ein Kreis beschrieben und eine Senkrechte PM auf die Gerade CO gefällt; wir wollen den Winkel PCO nicht mehr durch den Kreisbogen, sondern durch die Länge der Linien PM messen. Ist der Winkel klein, so ist PM natürlich ebenfalls klein; je mehr sich jedoch der Winkel einem rechten nähert, um so länger wird PM (Fig. 62). Das Verhältnis der Länge dieser Linie zu dem Radius des Kreises heisst der »Sinus« des Winkels; ist der Radius = 1, so ist die Länge von PM der Wert des Sinus. Letzterer kann nie grösser als

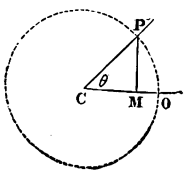

Fig. 61.

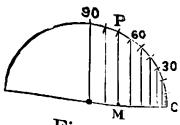

Fig. 62.

Digitized by Google

1 sein, aber er kann alle Werte zwischen + 1 und — 1 annehmen. Die Länge der Linie CM hängt ebenfalls von der Grösse des Winkels ab. Ist der Winkel sehr klein, so ist CM fast ebenso lang wie CO; nähert sich der Winkel einem rechten, so ist CM sehr kurz. Die Länge der Linie CM heisst (wenn der Radius wieder = 1 gesetzt wird) der »Cosinus« des Winkels. Nennen wir diesen Winkel θ, so können wir diese Funktionen kurz, wie folgt, bezeichnen:

$$\text{Sin } \theta = \frac{PM}{CP}$$

$$\text{Cos } \theta = \frac{CM}{CP};$$

132. Berechnung durch den Tangens. Man ziehe durch den Punkt O des Kreises (Fig. 63) eine den Kreis berührende Gerade, die Tangente, und verlängere CP bis zum Schnittpunkte T mit der Tangente. Dann können wir den Winkel PCO durch das Verhältnis der Länge der Tangente OT zum Radius messen. Da der Radius = 1, so ist der numerische Wert dieses Verhältnisses gleich der Länge von OT, und wir können daher OT die »Tangente« des Winkels OCP nennen. Es ist klar, dass, je kleiner der Winkel, desto kleiner auch die Tangente ist, und umgekehrt. Ist der Winkel ein rechter, so ist die Tangente unendlich gross. Es lässt sich zeigen, dass das Verhältnis des Sinus zum Cosinus gleich dem Verhältnis der Tangente zum Radius ist, d. h. der Tangens eines Winkels ist gleich seinem Sinus, dividiert durch seinen Cosinus. Die Formel für Tangens lässt sich also schreiben:

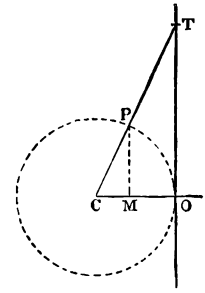

Fig. 63.

$$\text{Tan } \theta = \frac{TO}{OC} = \frac{PM}{MC}.$$

133. Körperliche Winkel. Wenn sich drei oder mehrere Ebenen in einem Punkte durchschneiden, so bilden sie einen körperlichen Winkel; einen solchen hat man z. B. an der Spitze einer Pyramide oder eines Kegels, desgleichen an jeder Ecke eines geschliffenen Diamants. Hat man eine Fläche von gegebener Gestalt und in ihrer Nachbarschaft einen Punkt, so sagt man, jene Fläche habe in dem Punkte einen gewissen körperlichen Winkel; derselbe lässt sich darstellen, indem man gerade Linien von allen Punkten der Begrenzungslinie der Fläche nach dem gegebenen Punkte zieht (Fig. 64). Dadurch entsteht ein unregelmässiger Kegel, dessen körperlicher Winkel gleich demjenigen ist,

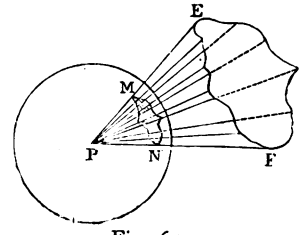

Fig. 64.

Digitized by Google

welchen die Fläche EF in dem Punkte P hat. Um diesen körperlichen Winkel zu berechnen, befolgen wir eine ähnliche Methode, wie in dem Falle, wo wir einen ebenen Winkel in Radien messen wollen. Wir legen um den Punkt P eine Kugel vom Radius 1, welche den Kegel in einer Fläche MN schneidet; die auf diese Weise ausgeschnittene Fläche misst den körperlichen Winkel. Die ganze Oberfläche der Kugel ist 4π. Der körperliche Winkel, welchen eine Halbkugel im Mittelpunkte hat, ist gleich 2π.

Tabelle der natürlichen Sinus und Tangens.

Grade	Sin	Tang	
0	0,000	0,000	90
1	0,017	0,017	89
2	0,035	0,035	88
3	0,052	0,052	87
4	0,070	0,070	86
5	0,087	0,087	85
6	0,105	0,105	84
7	0,122	0,123	83
8	0,139	0,141	82
9	0,156	0,158	81
10	0,174	0,176	80
15	0,259	0,268	75
20	0,342	0,364	70
25	0,423	0,466	65
30	0,500	0,577	60
35	0,574	0,700	55
40	0,643	0,839	50
45	0,707	1,000	45
50	0,766	1,192	40
55	0,819	1,428	35
60	0,866	1,732	30
65	0,906	2,145	25
70	0,940	2,747	20
75	0,966	3,732	15
80	0,985	5,671	10
81	0,988	6,314	9
82	0,990	7,115	8
83	0,993	8,144	7
84	0,995	9,514	6
85	0,996	11,43	5
86	0,998	14,30	4
87	0,999	19,08	3
88	0,999	28,64	2
89	0,999	57,29	1
90	1,000	Infin.	0
	Cos.	Cot.	Grade.

Digitized by Google

XII. VORLESUNG: *Erdmagnetismus.*

134. Der Schiffskompass. Im Art. 79 wurde erwähnt, dass der bei Mechanikern käufliche Kompass aus einer magnetisierten Stahlnadel besteht, welche auf einer feinen Spitze über einer mit den Himmelsgegenden versehenen Karte schwebt. Der **Schiffskompass** hat jedoch eine etwas andere Einrichtung.

Fig. 65 zeigt eine der Einrichtungen des Schiffskompasses, wie derselbe zu nautischen Beobachtungen benutzt wird. Die

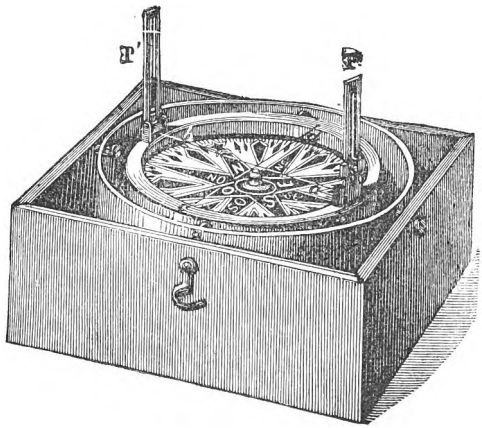

Fig. 65.

in die 32 »Punkte des Kompasses« eingeteilte Karte ist hier an der Nadel befestigt, und dreht sich gleichzeitig mit derselben, so dass der mit N bezeichnete Punkt *der Karte* stets nach Norden zeigt. Bei den neuesten und besten Schiffskompassen sind mehrere Magnetnadeln nebeneinander gestellt, da es sich herausgestellt hat, dass die Angaben solcher zusammengesetzten Nadeln zuverlässiger sind. Die eisernen Beschläge hölzerner Schiffe und eiserne Schiffe selbst beeinflussen den Kompass, welcher deshalb durch kompensierende, in seiner Nähe befindliche Eisenmassen geschützt werden muss, falls man denselben nicht oben auf einem Maste aufstellen will.

Digitized by Google

135. Die Erde ein Magnet. Gilbert machte die wichtige Entdeckung, dass die Kompass-Nadel deshalb nach Norden und Süden zeigt, weil die Erde selbst ebenfalls ein grosser Magnet ist. Die magnetischen Pole der Erde fallen jedoch nicht ganz mit dem geographischen Nordpol, resp. Südpol zusammen. Der magnetische Nordpol der Erde liegt in einer Entfernung von mehr als 1000 Meilen vom geographischen Nordpole, nämlich 70° 5′ nördlicher Breite und 96° 46′ westlicher Länge. Derselbe wurde im Jahre 1831 von J. C. Ross auf der Insel Boothia Felix, gerade auf dem Polarkreise, aufgefunden. Den magnetischen Südpol der Erde hat man bis jetzt noch nicht erreicht; wegen der unregelmässigen Verteilung des Magnetismus scheinen übrigens 2 magnetische Südpole zu existieren.

136. Deklination. In Folge dieser natürlichen Verteilung zeigt die Kompassnadel nicht an allen Orten der Erde nach dem wahren Norden, resp. Süden. In London z. B. zeigte die Kompassnadel im Jahre 1881 ungefähr 18° 33′ westlich vom wahren Norden. Dieser Winkel zwischen dem »magnetischen Meridian« [1]) und dem geographischen Meridian eines Ortes heisst seine magnetische **Deklination.** Die Deklination entdeckte Columbus im Jahre 1492; dieselbe scheint den Chinesen schon früher bekannt gewesen zu sein, und soll in Europa von Peter Pellegrinus schon zu Anfang des 13. Jahrhunderts beobachtet worden sein. Auch Sebastian Cabot von Bristol wird die Entdeckung zugesprochen, doch mit nur geringer Glaubwürdigkeit. Die Thatsache, dass die Deklination an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche eine andere ist, ist ohne Zweifel die Entdeckung des Columbus. —

Damit man sich beim Steuern eines Schiffes nach dem Kompass richten kann, muss man magnetische Karten (Art. 139) anfertigen und die Deklination an verschiedenen Orten genau

1) Der *magnetische Meridian* eines Ortes ist eine gedachte Ebene, welche man sich durch den Zenith, den magnetischen Nordpol und Südpol gelegt denken kann; man beobachtet die letzteren an einer horizontal aufgehängten Kompassnadel.

Digitized by Google

messen. Die vertikalen Stäbe PP′ des in Fig. 65 abgebildeten »Azimuth Kompasses« haben den Zweck, einen Stern in Augenschein zu nehmen, dessen Stellung man aus astronomischen Tabellen kennt, um auf diese Weise den magnetischen Meridian des Ortes mit dem geographischen Meridian vergleichen und den Winkel zwischen ihnen berechnen zu können.

137. Inklination. Der Instrumentenmacher Norman fand im Jahre 1576, dass eine schwebende Magnetnadel das Bestreben hat, mit ihrem Nordende sich nach unten zu neigen. Er fertigte daher eine **Inklinationsnadel** an, welche sich in einer vertikalen Ebene um eine horizontale Achse drehen konnte. Es ergab sich, dass die Inklination in London 71° 50′ betrug. Fig. 66 zeigt eine einfache Form der Inklinationsnadel. Die in dem magnetischen Observatorium zu Kew gebrauchten Inklinatorien sind weit genauere und empfindlichere Instrumente. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass s die Inklination ebenso wie die Deklination, an verschiedenen Orten der Erdoberfläche verschieden ist und dass sie jährlichen Aenderungen unterliegt. Die Inklination in London betrug für das Jahr 1881 67° 39′. Am magnetischen Nordpol stellt sich die Inklinationsnadel aufrecht. Die folgende Tabelle enthält Angaben der Deklination, der Inklination und der totalen magnetischen Kraft für mehrere wichtige Plätze, wobei die Werte annähernd für das Jahr 1880 richtig sind:

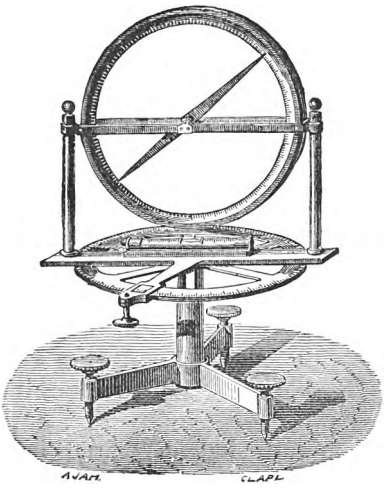

Fig. 66.

Digitized by Google

	Dekl.	Inkl.	Totale Kraft in C.G.S.-Einheiten.
Boothia Felix . . .	keine	90° N	0,65
London	18° 40′ W	67° 40′ N	0,47
St. Petersburg . . .	0° 40′ W	70° N	0,48
Berlin	11° 30′ W	64° N	0,48
Paris	16° 45′ W	66° N	0,47
Rom	11° 30′ W	60° N	0,45
New-York	7° 57′ W	72° 12′ N	0,61
Mexiko	7° 55′ O	45° ? N	0,48
Quito	7° 40′ O	25° ? N	0,35
St. Helena	26° 25′ W	28° S	0,31
Kapstadt	30° 2′ W	56° 30′ S	0,36
Sydney	9° 30′ O	62° 45′ S	0,57
Hobarton	8° 49′ O	71° 5′ S	0,64
Tokio	4° 5′ W	50° N	0,45

138. Intensität. Um den Magnetismus eines Ortes genau anzugeben, muss man dreierlei kennen, die Deklination, die Inklination und die Intensität der magnetischen Kraft. Letztere wird nach einer der in der verhergehenden Vorlesung angeführten Methoden gemessen. Ihre Richtung ist die der Inklinationsnadel, welche sich, wie jeder Magnet, längs der Kraftlinien einzustellen strebt. Es ist jedoch praktischer, nicht die totale Intensität der Kraft in der Richtung der Inklination, sondern bloss die horizontale Komponente der Kraft, d. h. denjenigen Teil der Kraft, welcher in die Richtung der horizontalen Kompassnadel fällt, zu messen, aus welcher die totale Kraft berechnet werden kann, wenn man die Inklination kennt [1]). Oder wenn die horizontale und die vertikale Komponente der Kraft bekannt sind, so können sowohl die totale Kraft als auch

1) Denn ist H die horizontale Komponente der Kraft, I die totale Kraft und Θ der Inklinationswinkel, so ist $I = \frac{H}{\cos \Theta}$.

Digitized by Google

der Winkel der Inklination berechnet werden[1]). Die horizontale Komponente der Kraft oder die »Horizontal-Intensität« findet man entweder durch die Methode der Schwingungen oder durch die Methode der Ablenkung. Die mittlere Horizontalkraft des Erdmagnetismus betrug für das Jahr 1880 in London 18 Krafteinheiten, die totale Kraft (in der Inklinationslinie) beträgt 47 Krafteinheiten. Die Verteilung der magnetischen Kraft an verschiedenen Orten der Erdoberfläche ist unregelmässig, und variiert in den verschiedenen Breiten nach einem Näherungsgesetze, welches Biot aufstellte und wonach die Kraft dem Ausdrucke $\sqrt{1 + 3 \sin^2 l}$ proportional ist, wo l die magnetische Breite bedeutet.

139. Magnetische Karten. Es ist zweckmässig, magnetische Karten anzufertigen, auf welche Angaben, wie die der letzten Tabelle, eingetragen werden können. Derartige Karten können in verschiedener Weise angefertigt werden. So könnte man z. B. auf einer Karte von England überall die Richtung der Magnetnadel angeben oder die Kraftlinien verzeichnen. Besser ist es, auf der Karte diejenigen Orte anzugeben, an welchen die Deklination dieselbe ist, und diese Orte durch eine Linie zu verbinden. In Bristol zeigt die Magnetnadel im Jahre 1888 19° westlich vom geographischen Norden. In Torquay, Stafford, Leeds und Hartlepool ist die Deklination für jenes Jahr ebenso gross, wie in Bristol. Deshalb kann eine Linie, welche diese Städte verbindet, *eine Linie gleicher Deklination* oder eine **isogonische Linie** genannt werden. Man erkennt aus jener Karte, dass die Deklination im Nordwesten Englands grösser ist, als im Südosten. Wir könnten in ähnlicher Weise eine magnetische Karte anfertigen, auf welcher alle diejenigen Linien verzeichnet wären, welche Orte mit gleicher *Inklination* verbinden; solche Linien heissen **Isoklinen**. In England gehen sie von West-Süd-West nach Ost-Nord-Ost. Auf dem Globus gehen die isogoni-

1) Denn $H^2 + V^2 = I^2$, wo V die vertikale Komponente der Kraft bedeutet.

Digitized by Google

schen Linien grösstenteils vom magnetischen Nordpole nach der magnetischen Südpolarregion, doch ist ihre Gestalt in Folge der unregelmässigen Verteilung des Erdmagnetismus ziemlich verwickelt. Die Isoklinen des Globus führen um die Erde wie die Breitenkreise, sind jedoch ebenfalls von unregelmässiger Gestalt. So läuft z. B. diejenige Linie, welche die Orte verbindet, an welchen der nordsuchende Pol der Magnetnadel eine Inklination von 70° hat, quer durch England und Wales, geht durch Süd-Irland, durchschneidet alsdann den Atlantischen Ozean in südwestlicher Richtung, führt durch die Vereinigten Staaten mit nördlicher Abweichung und trifft gerade die süd-

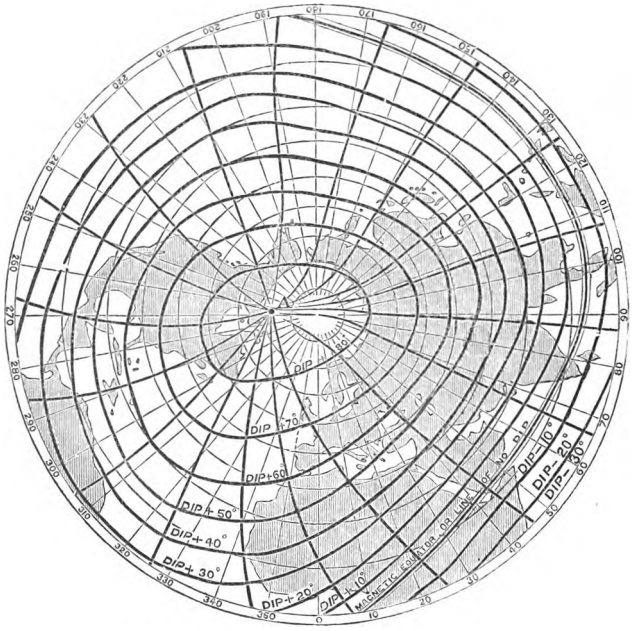

Fig. 67.

liche Spitze der Halbinsel Alaska. Dann geht sie beim Durchschneiden von China wieder etwas südwärts, krümmt sich jedoch beim Eintritt in russisches Gebiet wieder nach Norden.

Digitized by Google

Schliesslich durchschneidet sie den südlichen Teil der Ostsee und führt durch die Nordsee nach England zurück. In Fig. 67 ist eine Karte der Welt abgebildet, welche die Isoklinen der nördlichen Halbkugel enthält, sowie ein System von »erdmagnetischen Meridianen«, welche im magnetischen Nordpole A zusammentreffen. Diese Karte wurde von dem Königl. Astronomen George Airy für seinen »Treatise on Magnetism« entworfen.

140. Variationen des Erdmagnetismus. Wir haben bereits erwähnt, dass Deklination wie Inklination mehrfachen Aenderungen unterworfen sind; einige dieser Aenderungen gehen sehr langsam vor sich, andere finden jedes Jahr statt, und noch andere jeden Tag.

141. Säkulare Aenderungen. Diejenigen Aenderungen, welche sich erst nach vielen Jahren wiederholen, heissen *säkulare Aenderungen.*

Die Variationen der *Deklination* sind erst seit dem Jahre 1580 aufgezeichnet; die Magnetnadel zeigte damals in London 11° östlich vom geographischen Norden. Diese östliche Deklination nahm allmählich ab, bis die Nadel im Jahre 1657 genau nach Norden zeigte. Dann bewegte sie sich weiter nach Westen, und erreichte um das Jahr 1816 ein Maximum von 24° 27′. Von dieser Zeit an ist die Deklination langsam bis auf ihren augenblicklichen Wert von 18° 33′ herabgesunken; in England nimmt sie jährlich um circa 7′ ab. Um das Jahr 1976 wird die Nadel wieder genau nach Norden zeigen, indem sie in etwa 320 Jahren einen vollständigen Cyklus von Aenderungen ausführt.

Die *Inklination* betrug 71° 50′ für das Jahr 1576 und nahm langsam bis zum Jahre 1720 zu, wo der Inklinationswinkel den Maximalwert von 74° 42′ erreichte. Seitdem hat die Inklination beständig abgenommen bis auf ihren augenblicklichen Wert von 67° 39′. Die Periode, in welcher ein Cyklus vollendet wird, ist nicht bekannt, doch ist die Aenderung der Inklination augenblicklich verhältnissmässig geringer, als vor 50 Jahren. Auf

Digitized by Google

der ganzen Erde ändern sich Deklination und Inklination gleichmässig. Die folgende Tabelle enthält die Angaben der säkularen Aenderungen in London.

Jahr	Deklination.	Inklination.
1576	—	71° 50′
1580	11° 17′ O	—
1600	—	72° 0′
1622	6° 12′	—
1634	4° 0′	—
1657	0° 0′ min.	—
1676	3° 0′ W.	73° 30′
1705	9° 0′	—
1720	13° 0′	74° 42′ max.
1760	19° 30′	—
1780	—	72° 8′
1800	24° 6′	70° 35′
1816	24° 30′ max.	—
1830	24° 2′	69° 3′
1855	23° 0′	—
1868	20° 33′	68° 2′
1878	19° 14′	67° 43′
1880	18° 40′	67° 40′
1888	17° 40′	67° 25′ (?)

Der Wert der *totalen magnetischen Kraft* oder der »Intensität« ändert sich ebenfalls allmählich. In der Nähe von London ergab die Messung der Intensität 0,4791 Krafteinheiten im Jahre 1848, 0,4740 im Jahre 1866 und im Anfange des Jahres 1880 0,4736 Krafteinheiten [1]). In Folge der beständigen Abnahme des Inklinationswinkels nimmt die horizontale Kompo-

1) D. h. ein magnetischer Nordpol von der Stärke 1 wird in der Richtung der Inklinationsnadel von einer mechanischen Kraft von etwas weniger als einer halben Krafteinheit getrieben.

Digitized by Google

nente (oder die »horizontale Intensität«) etwas zu. 1848 betrug sie 0,1716 Krafteinheiten, und 0,1797 Anfang 1880 [1]).

142. Tägliche Aenderungen. Bei genauer Beobachtung zeigen Deklinations- und Inklinationsnadel kleine tägliche Schwankungen. Um 7 Uhr vormittags beginnt die Kompassnadel eine Bewegung nach Westen und das dauert bis 1 Uhr nachmittags; nachmittags bewegt sich die Nadel langsam nach Osten zurück, bis circa 10 Uhr abends; hierauf bleibt sie in Ruhe; aber im Sommer fängt die Nadel ungefähr um Mitternacht wieder eine schwache Bewegung nach Westen an, und dreht dann noch vor 7 Uhr morgens wieder nach Osten um. Diese geringen Schwankungen — sie betragen nie mehr als 10′ — scheinen mit der Stellung der Sonne im Zusammenhange zu stehen; auch übt der Mond einen schwachen Einfluss auf die Stellung der Nadel aus.

143. Jährliche Aenderungen. Es findet auch eine jährliche Aenderung statt, welche der Bewegung der Erde um die Sonne entspricht. In Gross-Britannien ist die totale Kraft im Juni am grössten und im Februar am schwächsten, aber auf der südlichen Halbkugel, in Tasmanien ist es gerade umgekehrt. Die Inklination ist ebenfalls je nach der Jahreszeit verschieden, und zwar ist der Inklinationswinkel in England während der vier Sommermonate kleiner als die übrige Zeit des Jahres.

144. Die 11-jährige Periode. Der General Sabine fand, dass alle 11 Jahr eine beträchtlichere Aenderung der Deklination stattfindet. Schwabe bemerkte, dass die Wiederkehr dieser Perioden mit den 11jährigen Perioden zusammenfällt, wo wir ein Maximum von *Sonnenflecken* haben. Professor Balfour Stewart und andere haben versucht, eine gleiche pe-

---

1) Anm. des Uebers. In Berlin sind nach Kohlrausch, Leitfaden, die Elemente des Erdmagnetismus für 1887 die folgenden:

Deklination westl.	10,5°
Inklination	66,5°
Horizontalintensität	0,195.

Digitized by Google

riodische Wiederkehr des **Nordlichts** [1]) und anderer Naturerscheinungen festzustellen.

145. Magnetische Stürme. Man hat bisweilen beobachtet, dass eine plötzliche (obgleich sehr geringe) unregelmässige Störung bei allen Kompassnadeln eines beträchtlichen Gebietes der Erdoberfläche stattfindet. Solche Erscheinungen sind als magnetische Stürme bekannt; sie treten häufig gleichzeitig mit einem Nordlichte auf.

146. Selbst-aufzeichnende magnetische Apparate. In Kew und andern magnetischen Observatorien werden die täglichen und stündlichen Variationen der Magnetnadel in einem fortlaufenden Register verzeichnet. Man verfährt dabei auf folgende Weise: Von einer Lampe lässt man einen Lichtstrahl auf einen kleinen Spiegel fallen, welcher an dem Magnet angebracht ist, dessen Bewegung man beobachten will. Auf diese Weise wird ein heller Fleck auf einen Streifen Photographie-Papier reflektiert, welches so präpariert ist, dass es für Licht empfänglich ist. Durch ein Uhrwerk wird das Papier beständig weiter bewegt, und wenn der Magnet in Ruhe ist, so besteht die dunkle Spur auf dem Papier einfach aus einer geraden Linie. Bewegt sich aber der Magnet seitwärts, so verschiebt sich der vom Spiegel reflektierte Lichtfleck, und die photographierte Linie ist alsdann eine Kurve. Es steht zu erwarten, dass man durch Vergleichung solcher Aufzeichnungen von »*Magnetographen*« an weit von einander entfernten Beobachtungsstationen noch mehr Aufschluss über die Ursache des Erdmagnetismus und seiner Variationen erhält, worüber man bisher noch nichts gewisses feststellen konnte.

Die Erscheinung der Erdströme (Art. 403) scheint mit den Variationen des Erdmagnetismus im Zusammenhange zu stehen und kann stets beim Auftreten eines Nordlichts oder während eines magnetischen Sturmes beobachtet werden; doch ist bis jetzt noch nicht festgestellt, ob diese Ströme von den Variationen des Erdmagnetismus herrühren oder ob umgekehrt diese Variationen eine Folge der Ströme sind. Man weiss, dass die Verdunstung (vergl.

1) Vergl. Vorlesung XXIV, über Atmosphärische Elektrizität.

Digitized by Google

Art. 63), welche in den Tropen beständig vor sich geht, zur Folge hat, dass die aufsteigenden Ströme erhitzter Luft im Vergleich zur Erde positiv elektrisch werden. Diese Luftströme bewegen sich nordwärts und südwärts nach den kältern Polargegenden, wo sie dann niedersinken. Diese elektrischen Luftströme wirken dann wie wirkliche elektrische Ströme (vergl. Art. 337), und da sich die Erde in ihnen dreht, so wird auf dieselbe ein magnetischer Einfluss ausgeübt. Ob sich hieraus das allmähliche Wachsen des Erdmagnetismus erklärt, ist noch eine offene Frage. Durch die Einwirkung der Sonne und des Mondes bei Ebbe und Flut in der Atmosphäre liessen sich die in Art. 142 erwähnten Variationen ebenfalls erklären. Es ist von Bedeutung, hervorzuheben, dass bei allen magnetischen Stürmen die Intensität der Störungen in den den Polen am nächsten liegenden Gegenden am grössten ist, und dass die Magnetpole fast genau mit den Gegenden der grössten Kälte zusammenfallen; dass die Gegend, wo das Nordlicht (Art. 309) am stärksten auftritt, sich fast symmetrisch um den Magnetpol herum erstreckt. Es kann noch hinzugefügt werden, dass die schwachen, täglichen Erdströme (Art. 403) im Allgemeinen von den Polen nach dem Aequator zu gerichtet sind.

Digitized by Google

KAPITEL III.

ELEKTRISCHE STRÖME.

XIII. VORLESUNG: *Einfache Volta'sche Elemente.*

147. Es wurde bereits in der 4. Vorlesung erwähnt, dass die Elektrizität aus einem geladenen Körper durch einen beliebigen Leiter, wie z. B. durch einen Draht oder einen angefeuchteten Faden wegfliesst. Wenn man nun durch irgend eine Vorrichtung dafür sorgen könnte, dass dem Körper ebensoviel Elektrizität zugeführt würde, wie aus ihm wegfliesst, so würde man einen kontinuierlichen **Strom** erhalten. Ein solcher Strom fliesst stets durch einen leitenden Draht, falls seine beiden Enden auf ungleichen elektrischen Potentialen erhalten werden, gerade so wie ein Wärmestrom durch einen Metallstab fliesst, wenn seine Enden auf ungleichen Temperaturen erhalten werden, indem die Wärme stets von dem Ende mit höherer Temperatur nach dem Ende mit geringerer Temperatur strömt. Es ist zweckmässig anzunehmen, dass die Elektrizität vom + Ende zu dem — strömt, oder mit andern Worten: dass ein elektrischer Strom in der Richtung vom hohen Potential zum niedrigen fliesst. Es ist klar, dass ein solcher Strom beide Enden auf dasselbe Potential zu bringen strebt. Man hat den »Strom« bisweilen als einen doppelten aufgefasst, indem die + Elektrizität in der einen Richtung und die — Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung fliessen soll. Der einzige Beweis, welcher diese ganz überflüssige Annahme unterstützt, ist die Thatsache, dass sich bei der Zersetzung von Flüssigkeiten durch den Strom

Digitized by Google

die Atome teils an der Stelle, wo das Potential am höchsten ist, teils an der Stelle, wo dasselbe am niedrigsten ist, ansammeln.

Solche kontinuierlichen elektrischen Ströme, wie wir sie soeben beschrieben haben, werden gewöhnlich durch *Volta'sche Elemente* oder durch *Batterieen* solcher Elemente erzeugt, obschon es noch andere Mittel zur Erzeugung von Strömen gibt, welche später erwähnt werden sollen.

148. Die Entdeckungen Galvani's und Volta's. Die Entdeckung elektrischer Ströme datiert seit *Galvani*, eines Arztes in Bologna, welcher um das Jahr 1786 eine Reihe merkwürdiger und wichtiger Beobachtungen über die konvulsivischen Bewegungen anstellte, die der »Rückschlag« (Art. 26) und andere elektrische Entladungen an einem Froschschenkel hervorbringen. Hierbei machte er dann die Entdeckung, dass es nicht notwendig sei, zur Hervorbringung dieser Erscheinungen eine elektrische Maschine zu benutzen, sondern dass ein ähnliches konvulsivisches Zucken in dem Froschschenkel hervorgerufen wurde, wenn er zwei ungleiche Metalle, z. B. Eisen und Kupfer, mit einem Nerv resp. einem Muskel und dann mit einander in Berührung brachte. Galvani glaubte, dass diese Erscheinung eine Folge der vom Froschschenkel selbst erzeugten Elektrizität sei. Dagegen wies *Volta*, Professor an der Universität zu Pavia, nach, dass die Elektrizität nicht von dem Muskel oder dem Nerv, sondern von der Berührung der ungleichen Metalle herrühre. Wenn zwei Metalle, welche beide mit der Luft oder einem andern oxydierenden Medium in Berührung sind, zur gegenseitigen Berührung gebracht werden, so wird die Oberfläche des einen Metalls +, die des andern — elektrisch, wie bereits in Art. 71 festgestellt wurde. Obgleich die Ladungen sehr schwach sind, bewies Volta ihre Existenz auf doppelte Weise.

149. Berührungselektrizität: Beweis durch das Kondensator-Elektroskop. Die erste von Volta ersonnene Beweismethode stützt sich auf den Gebrauch des in Art. 71 erwähnten *Kondensator-Elektroskopes*. Dasselbe lässt sich in folgen-

Digitized by Google

der Weise verwenden, um die Erzeugung der Elektrizität nachzuweisen. Ein kleiner Stab, welcher aus zwei ungleichen Metallen, Zink und Kupfer, besteht, die zusammengelötet sind, wird in der Hand gehalten, so dass das eine Ende die untere Platte berührt, während gleichzeitig die obere Platte mit der »Erde« in Verbindung gebracht oder mit der Hand berührt wird (Fig. 68).

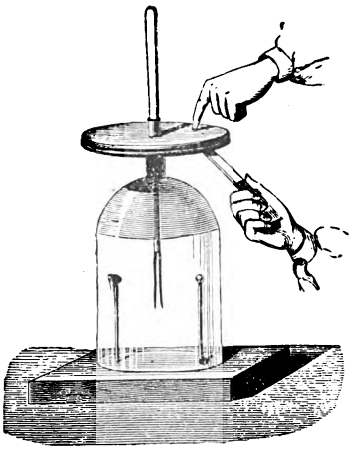

Fig. 68.

Während der Berührung findet eine elektrische Trennung an der Stelle statt, wo die ungleichen Metalle einander berühren, und auf den Platten des Kondensators sammeln sich entgegengesetzte Ladungen an. Wird die obere Platte von der untern abgehoben, so wird die Kapazität des Kondensators beträchtlich kleiner, und die kleine Elektrizitätsmenge kann jetzt das Potential der Platten auf einen höhern Grad bringen, so dass die Goldblätter demgemäss auseinandergehen [1]).

150. Die Volta'sche Säule. Volta's zweiter Beweis war weniger direkt, aber noch überzeugender. Er wies nach, dass, wenn mehrere solcher Berührungen ungleicher Metalle derart stattfinden, dass ihre elektrischen Wirkungen sich summieren, dieselben im Verhältnis der Anzahl der Berührungen kräftiger sind. Zu dem Zwecke konstruierte er den Apparat, welcher zu Ehren des Entdeckers den Namen **Volta'sche Säule** erhielt. (Fig. 69). Dieselbe wird in folgender Weise aufgebaut: Auf

1) Früher wurde diese Wirkungsweise so erklärt, dass man sagte, die Elektrizität, welche »gebunden« war, so lange die Platten des Kondensators dicht zusammen waren, wird »frei«, wenn die obere Platte aufgehoben wird; die obige Ausdrucksweise ist jedoch wissenschaftlicher und korrekter. Wer diese beiden Ausdrucksweisen nicht mit einander vereinbaren kann, lese noch einmal die Art. 47 und 48 durch.

Digitized by Google

eine Zinkplatte wird eine Kupferplatte gelegt, so dass sie einander berühren, dann auf die Kupferplatte ein mit Salzlösung getränkter Flanelllapen oder ein Stück Löschpapier, dann ein zweites Plattenpaar von Zink und Kupfer, und so weiter, so dass jedes Plattenpaar der Säule von dem folgenden durch einen feuchten Leiter getrennt ist. Eine solche *Säule* erzeugt dann, wenn sie aus einer Reihe solcher Plattenpaare besteht, eine hinreichende Elektrizitätsmenge, um einen empfindlichen Schlag zu geben, wenn man die oberste und die unterste Scheibe oder die sie verbindenden Drähte gleichzeitig mit den nass gemachten Fingern berührt. Wird ein einzelnes Plattenpaar zur Berührung gebracht, so wird die eine Platte bis zu einem gewissen Grade schwach + elektrisch, die andere — elektrisch, oder mit andern Worten, es besteht zwischen ihnen eine gewisse elektrische Potentialdifferenz (vergl. Art. 37). Werden aber mehrere Plattenpaare auf die angegebene Weise zusammengefügt, so dass die aufeinanderfolgenden Paare durch feuchte Leiter getrennt sind, so wird die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkscheibe und der letzten Kupferscheibe im Verhältnis der Anzahl der Plattenpaare vergrössert; denn jetzt summieren sich alle aufeinanderfolgenden kleinen Potentialdifferenzen.

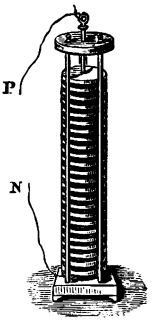

Fig. 69.

151. Der Becherapparat. Eine andere von Volta erfundene Zusammenstellung ist sein *Becherapparat.* Derselbe besteht aus einer Anzahl von Bechern (Fig. 70), welche sämtlich mit Salzlösung oder verdünnter Säure angefüllt sind. In diese tauchen eine Anzahl halb aus Zink, halb aus Kupfer zusammengelöteter Metallstreifen, und zwar derart, dass das Zink eines Streifens in den einen Becher, und das Kupfer desselben Streifens in einen zweiten Becher taucht. Die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten Becher ist dann wieder der Anzahl der Metallstreifen proportional. Dieser Apparat ist kräftig genug, um eine elektrische Glocke zu läuten, deren

Digitized by Google

Drähte an den ersten Zinkstreifen und den letzten Kupferstreifen befestigt sind, obschon der Apparat sich für diesen Zweck wenig

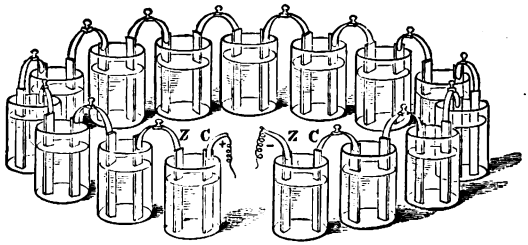

Fig. 70.

eignet. Den elektrischen Vorgang bei diesem Apparate macht man sich jedoch am besten klar, wenn man die Erscheinungen eines einzelnen Bechers oder *Elementes* studiert.

152. Einfaches Volta'sches Element. In einen Glaskrug giesse man etwas Wasser, mit welchem etwas Schwefelsäure oder eine andere oxydierende Säure vermischt ist (Fig. 71).

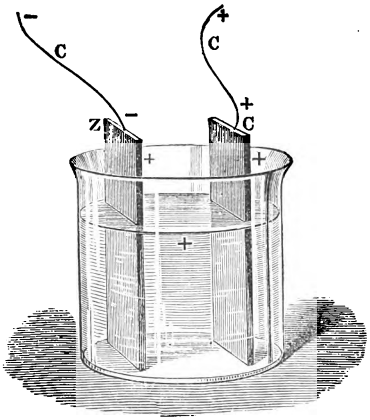

Fig. 71.

Dann tauche man zwei getrennte, reine Metallstreifen in die Flüssigkeit, einen von Zink Z und einen von Kupfer C. Dieses Element liefert einen kontinuierlichen elektrischen Strom, welchen man durch einen Draht fliessen lassen kann, dessen Enden mit den beiden Metallstreifen in Verbindung stehen. So lange der Strom fliesst, bemerkt man, dass der Zinkstreifen allmählich verbraucht wird; und daher rührt in der That die Energie, welche erforderlich ist, den Strom durch das Element und den damit verbundenen Draht zu treiben. Man kann daher das Element als eine Art von chemischem Schmelzofen betrachten, bei welchem das Zink

Digitized by Google

das Brennmaterial ist. Bevor man die Metallstreifen durch einen Draht verbindet, zeigt das Elektrometer keine merkliche Potentialdifferenz zwischen dem Kupfer und dem Zink an; da ersteres nur das Potential an einer Stelle in der Luft oder einem andern oxydierenden Medium ausserhalb des Zinks oder Kupfers, und nicht die Potentiale der Metalle selbst misst. Das Zink selbst hat ein Potential, welches ungefähr 1,86 Volt niedriger ist, als das der es umgebenden oxydierenden Media (vergl. Art. 422a); während das Potential des Kupfers nur circa 0,81 Volt geringer ist, da das Kupfer nicht so leicht oxydiert. Zwischen dem Kupfer und dem Zink besteht also eine latente Potentialdifferenz von circa 1,05 Volt; hierdurch entsteht aber erst dann ein Strom, wenn eine metallische Berührung stattfindet. Berühren sich die Metallstreifen, oder werden dieselben durch ein Paar Metalldrähte verbunden, so strömt die Elektrizität sofort durch das Metall vom Kupfer zum Zink, und ein kleiner Teil des Zinks wird gleichzeitig aufgelöst; indem das Zink seine latente Energie in dem Maasse verliert, wie seine Atome sich mit der Säure verbinden. Diese Energie wird dadurch verbraucht, dass eine elektrische Entladung durch die Säure hindurch nach dem Kupferstreifen bewerkstelligt wird, und von dort durch den Draht nach dem Zinkstreifen zurück. Der Kupferstreifen, von dem der Strom seinen Weg durch den *äussern* Verbindungskreis beginnt, heisst der *positive Pol*, und der Zinkstreifen der *negative Pol*. Werden zwei Kupferdrähte an die Enden der beiden Metallstreifen befestigt, so fliesst allerdings kein Strom, so lange die beiden Drähte getrennt sind, doch findet man, dass der mit dem Zink verbundene Draht negativ, und der mit dem Kupfer verbundene positiv elektrisch ist, da das Zink das *Bestreben* hat, zu oxydieren und die Elektrizität durch das Element hindurch vom Zink zum Kupfer zu treiben. Dieser Zustand ist in Figur 71 dargestellt; und diese Potentialverteilung führte einige zu der Ansicht, dass die Verbindungsstelle des Zinks mit dem Kupferdrahte der Ausgangspunkt des Stromes sei. Allein der wirkliche Ausgangspunkt

Digitized by Google

liegt im Elemente an der Zinkoberfläche, wo der chemische Prozess die Energie liefert; denn von dieser Stelle verbreiten sich durch die Flüssigkeit gewisse elektro-chemische Kräfte (welche im 11. Kapitel ausführlicher behandelt sind), in Folge deren die Potentialdifferenz beständig erneuert und dem + Pole ebenso schnell Elektrizität zugeführt wird, wie dieselbe durch den Draht zum negativen Pole abfliesst. Gleichzeitig bemerkt man, dass an der Oberfläche der Kupferplatte kleine Blasen von Wasserstoffgas erscheinen. Diese beiden Vorgänge dauern so lange wie die Drähte verbunden sind und einen geschlossenen Kreis bilden.

153. Wirkungen des Stromes. Den Strom selbst kann man nicht durch den Schliessungsdraht fliessen *sehen;* um daher zu beweisen, dass ein einzelnes Element oder eine Verbindung mehrerer einen Strom erzeugt, muss man einige der *Wirkungen* kennen, welche durch Ströme hervorgebracht werden können. Diese Wirkungen sind verschiedener Art. Ein durch einen dünnen Draht fliessender Strom erhitzt denselben; fliesst er in der Nähe einer Magnetnadel, so wird dieselbe durch ihn abgelenkt; fliesst er durch Wasser oder andere Flüssigkeiten, so werden dieselben zersetzt; und endlich, fliesst der Strom durch lebende Körper oder irgend einen empfindungsfähigen Teil derselben, so erzeugt er gewisse Empfindungen. Diese thermischen, magnetischen, chemischen und physiologischen Wirkungen sollen in besondern Vorlesungen behandelt werden.

154. Volta'sche Batterie. Vereinigt man mehrere solcher einfachen Elemente, indem man die Zinkplatte des einen mit der Kupferplatte des folgenden verbindet, und so weiter, so erhält man eine grössere Potentialdifferenz zwischen dem »Kupferpole« an dem einen Ende und dem »Zinkpole« an dem andern Ende der Reihe. Werden daher die beiden Pole durch einen Draht verbunden, so entsteht ein stärkerer elektrischer Strom, als wenn man bloss ein Element benutzt. Eine solche Vereinigung Volta'scher Elemente heisst eine Volta'sche **Batterie** [1]).

1) Einige Schriftsteller nennen sie Galvani'sche Batterie, zu Ehren Gal-

Digitized by Google

155. Elektromotorische Kraft. Der Ausdruck »*elektromotorische Kraft*« wird gebraucht, um diejenige Kraft zu bezeichnen, welche die Elektrizität von einer Stelle zur andern führt oder zu führen strebt [1]). Zur Abkürzung werden wir dieselbe bisweilen durch E.M.K. bezeichnen. In diesem besondern Falle ist sie offenbar eine Folge der Potentialdifferenz und derselben proportional. Gerade so, wie eine *Niveaudifferenz* in Wasserröhren einen *Druck* erzeugt, und letzterer einen Strahl, sobald der Hahn geöffnet wird, ebenso erzeugt eine *Potentialdifferenz elektromotorische Kraft*, und diese einen *Strom*, sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, um die Elektrizität durchströmen zu lassen. Elektromotorische Kraft kann daher bisweilen passend als eine Potentialdifferenz bezeichnet werden und *umgekehrt;* doch darf der Leser den Unterschied nicht vergessen.

156. Volta's Gesetze. Volta zeigte (Art. 71), dass die Potentialdifferenz zweier sich berührender Metalle nur von der Substanz derselben, nicht von ihrer Grösse, noch von der Grösse der Berührungsstelle abhing. Er zeigte auch, dass, wenn sich mehrere Metalle berühren, die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten der Reihe dieselbe ist, wie in dem Falle, wo

---

vani's; doch das Verdienst gebührt jedenfalls Volta. Die in Strömen fliessende Elektrizität wird bisweilen Volta'sche Elektrizität genannt oder Galvani'sche Elektrizität oder oft auch Galvanismus; doch unterscheidet sie sich, wie wir sehen werden, von der Reibungselektrizität oder irgend einer andern Elektrizität nur graduell, und beide Arten können durch Drähte fliessen und Eisen magnetisieren und chemische Verbindungen auflösen.

1) Der Anfänger darf »elektromotorische Kraft« oder diejenige Kraft, welche die Elektrizität zu bewegen strebt, nicht mit elektrischer »Kraft« verwechseln, d. h. jener Kraft, mit welcher die Elektrizität die Materie zu bewegen strebt. Newton hat ein für allemal den Begriff »Kraft« virtuell als dasjenige definiert, das die Materie bewegt oder zu bewegen strebt. Wird die Materie von einem Magnet bewegt, so sprechen wir ganz richtig von magnetischer Kraft; ebenso von elektrischer Kraft, wenn die Materie von der Elektrizität in Bewegung gesetzt wird. Aber E.M.K. ist etwas ganz anderes, und überhaupt keine »Kraft«, denn sie wirkt nicht auf die Materie, sondern auf die Elektrizität und strebt diese zu bewegen.

Digitized by Google

sich die beiden unmittelbar berühren. Einige quantitative Angaben der Untersuchungen von Ayrton und Perry finden sich in Art. 72. Bei einer Reihe von Elementen ist jedoch die Sache anders, als bei einer blossen Reihe von Metallen, denn taucht man zwei Metalle in eine leitende Flüssigkeit, so werden sie dadurch, wie wir gesehen haben, auf demselben oder fast demselben Potential erhalten. Wenn man daher die Zinkplatten und Kupferplatten der Elementenreihe alle in derselben Reihenfolge aufstellt, so dass sie alle elektromotorische Kräfte in derselben Richtung erregen, so ist *gesamte elektromotorische Kraft der Reihe gleich derjenigen eines Elements, multipliziert mit der Anzahl der Elemente.*

157. Bisher haben wir bloss Zink und Kupfer als Bestandteile einer Batterie erwähnt; doch kann man zwei beliebige Metalle dazu benutzen. Diejenige Batterie besitzt die grösste elektromotorische Kraft, oder wirkt am »stärksten«, zu welcher man 2 Metalle nimmt, die bei ihrer Berührung die grösste Potentialdifferenz erzeugen, oder welche in der »Kontakt-Reihe«, Art. 72, am weitesten von einander entfernt sind. Zink und Kupfer eignen sich in dieser Beziehung sehr gut; Zink und Silber würden, abgesehen von den Kosten, noch besser sein. Für kräftigere Batterieen ist eine Zusammenstellung von Zink und Platin oder von Zink und Kohle vorzuziehen.

158. **Widerstand.** Dieselbe elektromotorische Kraft erzeugt jedoch nicht in allen Fällen einen Strom von derselben *Stärke.* Die Stromstärke hängt nicht allein von der Kraft ab, welche die Elektrizität durch den Schliessungskreis zu treiben strebt, sondern auch von dem **Widerstande,** auf welchen dieselbe während des Fliessens trifft und den sie zu überwinden hat. Wenn man die Elemente mit Sand oder Sägespänen zum Teil verstopft (wie dies bisweilen bei den sogenannten Sägespäne-Batterieen geschieht, um sie brauchbar zu erhalten) oder wenn der Draht, welcher den Schliessungskreis vollständig macht, sehr lang oder sehr dünn ist, so geht die Wirkung zum Teil verloren, und der Strom ist schwächer, obgleich die E.M.K.

Digitized by Google

unverändert ist. Die Analogie mit den Wasserröhren kann auch hier zu Hilfe genommen werden. Der Druck, welcher das Wasser durch Röhren treibt, ist von der Niveaudifferenz zwischen der Cisterne, aus welcher das Wasser fliesst, und dem Gefäss, bis zu welchem es fliesst, abhängig; allein die Wassermenge, welche durch die Röhren hindurchfliesst, hängt nicht allein vom Drucke, sondern auch von dem Widerstande, auf den sie trifft, ab. Denn ist die Röhre sehr dünn oder mit Sand oder Sägspänen verstopft, so fliesst das Wasser nur langsam durch.

Die Metalle leiten den elektrischen Strom im allgemeinen gut; ihr Widerstand ist gering; doch dürfen Drähte aus Metall nicht zu dünn, noch zu lang sein, da sonst ihr Widerstand zu gross, und sie dann nur einen schwachen Strom durchlassen. Die Flüssigkeiten in der Batterie leiten bei Weitem nicht so gut, wie die Metalle; auch haben verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Widerstände. Reines Wasser hat überhaupt kein Leitungsvermögen, und ist für die schwache Elektrizität der Volta'schen Batterie fast ein vollkommener Isolator, obgleich es für die hochgespannte Reibungselektrizität ein guter Leiter ist, wie wir gesehen haben. Wasser, in welchem Salz oder Salpeter aufgelöst ist, ist ein guter Leiter, desgleichen verdünnte Säuren, obschon konzentrierte Schwefelsäure ein schlechter Leiter ist. Den Widerstand der Flüssigkeit in den Elementen kann man nötigenfalls dadurch verringern, dass man grössere Metallplatten anwendet und dieselben näher zusammenrückt. Gase sind schlechte Leiter; daher kommt es, dass die Wasserstoffblasen, welche sich während der Wirksamkeit des Elementes an die Kupferplatte ansetzen, den innern Widerstand des Elementes vermehren, indem sie die wirksame Oberfläche der Platten verkleinern.

XIV. VORLESUNG: *Chemische Vorgänge im Elemente.*

159. Mit der Erregung eines elektrischen Stromes durch ein Volta'sches Element sind stets chemische Vorgänge im Ele-

Digitized by Google

mente verbunden. Eins der Metalle muss wenigstens leicht oxydierbar sein, und die Flüssigkeit muss so beschaffen sein, dass sie auf das Metall einwirken kann. Die Erfahrung lehrt denn auch, dass Zink und die andern Metalle, welche an dem elektropositiven Ende der Kontakt-Reihe (vergl. Art. 72) stehen, oxydierbar sind, während die elektronegativen Körper — Kupfer, Silber, Gold, Platin und Kohle — weniger leicht oxydieren; die letzten drei widerstehen sogar der Einwirkung jeder Säure. Es lässt sich nicht nachweisen, dass ihr elektrisches Verhalten eine Folge ihres chemischen Verhaltens ist; ebensowenig ist umgekehrt ihr chemisches Verhalten eine Folge ihres elektrischen. Wahrscheinlich entspringen beide aus einer gemeinsamen Quelle (vergl. Art. 422a und Art. 75).

160. Taucht man ein Stück ganz reines Zink allein in verdünnte Schwefelsäure, so wird dasselbe von der Säure nicht angegriffen. Doch das gewöhnliche käufliche Zink ist nicht rein, und wird aufgelöst, wenn man es in verdünnte Schwefelsäure taucht, indem zahlreiche Wasserstoffblasen von der Oberfläche des Metalls aufsteigen. Schwefelsäure ist ein zusammengesetzter Körper, bei dem jedes Molekül aus einer bestimmten Gruppe von Atomen besteht, nämlich aus 2 Atomen Wasserstoff, 1 Atom Schwefel, und 4 Atomen Sauerstoff; oder symbolisch: H_2SO_4. Der chemische Prozess, bei dem das Zink sich mit dem Radikal der Säure verbindet und der Wasserstoff ausscheidet, lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$$

Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff.

Das bei diesem Prozesse gebildete schwefelsaure Zinkoxyd bleibt in der Flüssigkeit aufgelöst.

Wenn man nun eine Platte *reines* Zink und eine Platte von einem weniger leicht oxydierenden Metall — Kupfer oder Platin oder am besten Kohle (die harte Kohle aus den Gasretorten) — nebeneinander in den die Säure enthaltenden Becher taucht, so geht kein wahrnehmbarer chemischer Prozess vor, so lange man den Stromkreis noch nicht geschlossen hat, ent-

Digitized by Google

weder dadurch, dass man die beiden Platten durch einen Draht verbindet oder dadurch, dass man sie zur unmittelbaren Berührung bringt. Sobald jedoch der Kreis vollständig geschlossen ist, beginnt der Strom zu fliessen, und die chemischen Prozesse treten ins Leben, indem sich das Zink in der Säure auflöst und die Säure ihren Wasserstoff in Gestalt von kleinen Blasen ausscheidet. Man bemerkt jedoch, dass diese Wasserstoffblasen sich weder an der Zinkplatte, noch in der Flüssigkeit entwickeln, sondern *an der Oberfläche der Kupferplatte* (resp. der Kohlenplatte). Diese scheinbare Ueberführung des Wasserstoffgases durch die Flüssigkeit von der Oberfläche der Zinkplatte nach der Oberfläche der Kupferplatte, wo dasselbe auftritt, ist höchst bemerkenswert. Die sinnreiche Theorie, welche Grotthuss zur Erklärung dieser Erscheinung aufstellte, ist in der 38. Vorlesung: über Elektro-Chemie, auseinandergesetzt.

Diese chemischen Prozesse dauern so lange wie der Strom fliesst. Das in jedem Becher verbrauchte Zink ist der Elektrizitätsmenge proportional, welche durch den Schliessungsbogen während der Thätigkeit der Batterie hindurchströmt. Die Menge des entwickelten Wasserstoffgases ist dem verbrauchten Zink und auch der Stromstärke proportional. Nachdem die Säure auf diese Weise das Zink in sich aufgelöst hat, wirkt sie nicht mehr als ätzendes Auflösungsmittel; sie ist »getötet« worden, wie die Arbeiter sagen, denn sie ist in schwefelsaures Zink verwandelt. Die Batterie hört deshalb auf zu wirken, entweder, wenn alles Zink aufgelöst ist oder wenn die Säure erschöpft ist, d. h. wenn sie vollständig in schwefelsaures Zink verwandelt ist. Starke Zinkplatten halten lange Zeit vor, aber die Säuren müssen oft erneuert und die verbrauchte Flüssigkeit ausgegossen werden.

161. Lokale Wirkung. Ist der Schliessungsbogen nicht vollständig, so kann der Strom nicht fliessen, und man sollte erwarten, dass ein chemischer Prozess nicht stattfände, solange die Batterie keinen Strom erzeugt. Das unreine Zink jedoch, wie solches im Handel vorkommt, bleibt in der Säure nicht

Digitized by Google

unangetastet, sondern ist in steter Auflösung begriffen und scheidet beständig Wasserstoffblasen aus. Diese sogenannte **lokale Wirkung** erklärt sich auf folgende Weise: Die fremden Beimischungen im Zink bestehen aus Zusätzen von Eisen, Arsenik und andern Metallen. Gesetzt, es befände sich irgendwo an der Oberfläche ein Eisenteilchen, das mit der Säure in Berührung kommt. Dasselbe verhält sich dann wie die Kupferplatte einer Batterie gegen die Zinkteilchen in ihrer Umgebung, denn es wird dadurch eine lokale Potentialdifferenz an der Stelle, wo metallische Berührung stattfindet, erzeugt und in Folge dessen auch ein lokaler Strom, welcher von den Zinkteilchen durch die Säure zu dem Eisenteilchen fliesst, und auf diese Weise findet ein stetiger Verbrauch des Zinks statt, sowohl wenn der Schliessungsbogen der Batterie geschlossen, als auch wenn er offen ist.

162. Amalgamisierung des Zinks. Wir wissen jetzt, weshalb ein Stück gewöhnliches Zink, wie es im Handel vorkommt, angegriffen wird, wenn es mit einer Säure in Berührung kommt. In Folge der metallischen Zusätze in demselben tritt an seiner ganzen Oberfläche eine lokale Wirkung ein. Um dieselbe zu beseitigen, und um das Aufzehren des Zinks zu verhüten, so lange die Batterie nicht in Thätigkeit ist, ist es gebräuchlich, die Oberfläche der Zinkplatten mit Quecksilber zu **amalgamieren.** Zu diesem Zwecke muss die zu amalgamierende Platte gereinigt werden, indem man sie in eine Säure taucht, dann giesst man ein Paar Tropfen Quecksilber auf die Oberfläche der Platte und reibt dieselben mit einem leinenen Lappen in die Platte ein. Das Quecksilber verbindet sich mit den Zinkteilchen an der Oberfläche der Platte und bildet ein breiiges Amalgam. Die Eisenteilchen lösen sich in dem Quecksilber nicht auf, sondern treten an die Oberfläche, von wo sie durch die sich bildenden Wasserstoffblasen schnell hinweggeführt werden. Da sich das Zink dieses breiigen Amalgams in der Säure auflöst, so verbindet sich der Quecksilberüberzug mit neuen

Digitized by Google

Zinkteilchen und bietet der Flüssigkeit auf diese Weise eine stets reine glatte Oberfläche dar.

Eine neuere, bessere Methode besteht darin, dem geschmolzenen Zink, bevor dasselbe in Platten oder Stäbe gegossen wird, ungefähr 4% Quecksilber beizumischen. Sind die Zinkplatten einer Batterie gut amalgamiert, so dürfen sich keine Wasserstoffblasen entwickeln, so lange der Schliessungsbogen offen ist. Trotzdem findet während der Thätigkeit der Batterie stets eine kleine, zerstörende, lokale Wirkung statt. Jacobi fand, dass, während am + Pole sich 1 Teil Wasserstoffgas bildete, am — Pole 33,6 Teile Zink aufgelöst wurden, anstatt der 32,5 Teile, welche das chemische Aequivalent des Wasserstoffes ausmachen.

163. Polarisation. Die Wasserstoffblasen, welche an der Oberfläche der Kupferplatte frei werden, setzen sich an derselben in grosser Zahl fest und bilden an ihrer Oberfläche einen Ueberzug; daher wird in kurzer Zeit der wirksame Teil der Oberfläche der Kupferplatte bedeutend verkleinert. Wird ein einfaches Element oder eine Batterie von Elementen in Thätigkeit gesetzt, um einen Strom zu erzeugen, so stellt sich heraus, dass die Stromstärke nach wenigen Minuten, ja schon nach einigen Sekunden ganz bedeutend nachlässt und sogar fast ganz aufhört. Diese unmittelbare Abnahme der Stromstärke, die man mit einem Galvanometer und einem Paar in Säure getauchter Zink- und Kupferplatten beobachten kann, ist fast ausschliesslich die Folge des Ueberzuges von Wasserstoffblasen, welche sich an dem Kupfer-Pole festsetzen. Eine in diesem Zustande befindliche Batterie heisst „polarisiert".

164. Wirkungen der Polarisation. Der Ueberzug von Wasserstoffblasen beeinträchtigt die Stromstärke des Elements in doppelter Weise:

1) Er schwächt den Strom durch den vermehrten *Widerstand,* welchen er demselben bietet, denn Gasblasen sind schlechte Leiter, und

2) er schwächt den Strom dadurch, dass er eine entgegen-

Digitized by Google

gesetzte *elektromotorische Kraft* in's Leben ruft; denn der Wasserstoff ist ein fast ebenso leicht oxydierbarer Körper, wie Zink, besonders wenn er frisch entwickelt ist (oder in statu nascendi ist) und er ist elektropositiv, da er in der Reihe des Art. 72 oben steht. Daher erzeugt der Wasserstoff selbst eine Potentialdifferenz, welche einen Strom entsendet, welcher die entgegengesetzte Richtung des wahren Zink-Kupfer-Stromes hat.

Es ist daher von grosser Wichtigkeit, diese Polarisation zu beseitigen, denn sonst würden die von Batterieen erzeugten Ströme nicht konstant sein.

165. Mittel gegen innere Polarisation. Man hat verschiedene Mittel angewendet, um die Polarisation der Elemente zu verringern oder zu verhindern. Diese Mittel sind entweder mechanischer oder chemischer oder elektrochemischer Natur.

1) *Mechanische Mittel.* Werden die Wasserstoffgasblasen einfach von der Oberfläche des + Poles abgewischt, so wird der durch sie verursachte Widerstand verringert. Wenn man mittelst einer Röhre Luft in die Säure-Lösung bläst oder die Flüssigkeit umrührt oder dieselbe durch passend angebrachte Heber in steter Bewegung hält, so wird der Widerstand ebenfalls kleiner. Ist die Oberfläche rauh oder mit Spitzen versehen, so sammeln sich die Gasblasen leichter an den Spitzen und werden schnell nach der Oberfläche geführt und so unschädlich gemacht. Dieses Mittel wurde bei dem **Smee'schen Elemente** angewendet, welches aus einer Zinkplatte und einer platinierten Silberplatte bestand, die in verdünnte Schwefelsäure tauchten; von der Silberplatte, deren Oberfläche auf diese Weise mit einem rauhen Ueberzuge von fein zerteiltem Platin bedeckt war, lösten sich die Wasserstoffgasblasen leicht ab; trotzdem nimmt der Strom einer Batterie von Smee'schen Elementen nach wenigen Minuten bedeutend ab.

2) *Chemische Mittel.* Wird der Säure ein stark oxydierender Körper beigefügt, so vernichtet derselbe die Wasserstoffgasblasen, während dieselben noch in der Entwicklung begriffen sind, und verhindert auf diese Weise sowohl den erhöhten in-

Digitized by Google

nern Widerstand, als auch die entgegengesetzte elektromotorische Kraft. Solche Körper sind: doppelt chromsaures Kali, Salpetersäure und Chlorkalk (sogenannter Bleichkalk). Diese Körper würden jedoch das Kupfer eines Zink-Kupferelementes angreifen. Deshalb kann man sie nur bei einem Zink-Kohlen- oder Zink-Platin-Elemente anwenden. Salpetersäure greift auch das Zink an, wenn der Schliessungsbogen offen ist. Deshalb kann man dieselbe nicht in einem und demselben Becher mit der Zinkplatte gebrauchen. Bei der von Poggendorf erfundenen **Chromsäure-Batterie** thut man doppelt-chromsaures Kali zu der Schwefelsäure. Dieses Element wird höchst zweckmässig als »Flaschen-Element« eingerichtet (Fig. 72), bei welcher eine Zinkplatte der — Pol ist, während ein Paar Kohlenplatten zu beiden Seiten des Zinks an ihrem obern Ende zu einem + Pol verbunden sind. Da diese Lösung auf das Zink einwirkt, auch wenn der Schliessungsbogen offen ist, so befestigt man die Zinkplatte an einem Stabe, an welchem sie aus der Flüssigkeit herausgehoben werden kann, wenn das Element nicht in Thätigkeit sein soll. Weitere chemische Mittel zur Vermeidung der Polarisation sollen bei Beschreibung anderer Formen der Elemente angegeben werden.

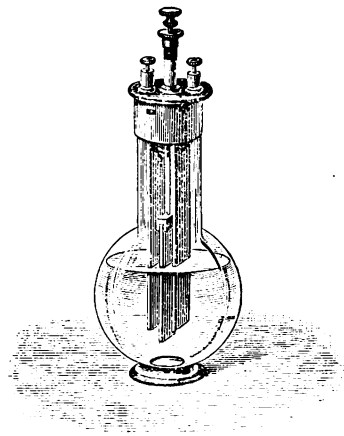

Fig. 72.

3) *Elektrochemische Mittel.* Es ist beim Gebrauch doppelter Becher, wie sie in der nächsten Vorlesung beschrieben werden, möglich, den Apparat derart einzurichten, dass ein festes Metall, z. B. *Kupfer*, an statt der Wasserstoffblasen, an der Stelle, wo der Strom die Flüssigkeit verlässt, ausgeschieden wird. Dieser elektrochemische Umsatz verhindert jegliche Polarisation.

Digitized by Google

166. Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente. Wir wollen diesen Abschnitt damit beschliessen, die beiden Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente anzugeben:

1) *Die chemische Wirkung in einem Elemente ist der Elektrizitätsmenge, welche durch dasselbe hindurchströmt, proportional,* oder mit andern Worten, ist der *Stärke* des durch dasselbe gehenden Stromes proportional.

Eine Elektrizitätsmenge von einem *Coulomb* [1]) macht bei ihrem Durchgange durch das Element 0,000010352 Gramm Wasserstoffgas frei, und löst 0,00033644 Gramm Zink in der Säure auf.

2) *Die chemische Wirkung ist in jedem Elemente einer Batterie, welche aus einer Reihe von Elementen besteht, gleich gross.*

Auf das erste dieser Gesetze wurde Faraday geführt, als er Volta's Kontakttheorie zu widerlegen versuchte. Er sah voraus, dass es mit dem Prinzip von der Erhaltung der Energie nicht vereinbar wäre, dass eine blosse Kontaktkraft die Quelle eines kontinuierlichen Stromes sein sollte; daher schrieb er den Strom den chemischen Wirkungen zu, welche ihm an Quantität proportional waren. Wie die Ansichten Volta's und Faraday's in Einklang gebracht werden können, wurde im letzten Abschnitt des Art. 72 angedeutet.

XV. VORLESUNG: *Volta'sche Batterieen.*

167. Eine gute Volta'sche Batterie sollte alle oder die meisten der folgenden Bedingungen erfüllen:

1) Ihre elektromotorische Kraft muss gross und konstant sein.

2) Ihr innerer Widerstand muss gering sein.

---

1) In Betreff der Definition des Coulomb oder der praktischen Einheit der Elektrizität vergl. Art. 323.

Digitized by Google

3) Sie muss einen konstanten Strom liefern, und deshalb frei von Polarisation sein, ohne sich schnell abzunutzen, und ohne zu häufige Erneuerung der Säure zu erfordern.
4) Sie muss vollständig ruhen, wenn der Schliessungsbogen offen ist.
5) Sie muss billig und aus dauerhaftem Material sein.
6) Sie muss leicht zu handhaben sein und darf keine ätzenden Dünste ausströmen.

168. Allen diesen Bedingungen genügt jedoch keine einzige Batterie, und die eine Batterie eignet sich besser zu diesem Zweke, die andere zu jenem. Will man z. B. durch einen langen Draht telegraphieren, so ist ein bedeutender innerer Widerstand in der Batterie von keinem grossen Nachteil; während zur Erzeugung eines elektrischen Lichtes ein grosser innerer Widerstand durchaus vermieden werden muss. Die elektromotorische Kraft einer Batterie hängt von dem Material des Elementes und von der Anzahl der mit einander verbundenen Elemente ab, und man kann daher eine grosse E.M.K. dadurch erzielen, dass man das rechte Material wählt und eine grosse Anzahl von Elementen verbindet. Der Widerstand innerhalb des Elementes lässt sich dadurch vermindern, dass man recht grosse Platten wählt, dieselben nahe aneinander stellt, so dass die Dicke der zwischen ihnen befindlichen Flüssigkeitsschicht so klein als möglich wird, und dass man gut leitende Flüssigkeiten aussucht. Von den unzähligen Formen einer Batterie, welche bisher konstruiert worden sind, können nur die von hervorragender Bedeutung beschrieben werden. Man kann die Batterieen in zwei Klassen einteilen, in solche mit einer und in solche mit 2 Flüssigkeiten oder Elektrolyten.

Elemente mit einer Flüssigkeit.

169. Das einfache Volta'sche Element mit seinen Zink- und Kupferplatten wurde bereits beschrieben. Cruickshank kam auf den Gedanken, die Platten aufrecht in einen Trog zu stellen,

Digitized by Google

da hierdurch eine kräftigere Batterie gewonnen würde. Dr. Wollaston schlug vor, eine Kupferplatte von doppelter Grösse zu benutzen, die so umgebogen war, dass sie die Zinkplatte von beiden Seiten eng umgab, da auf diese Weise der Widerstand verringert wurde. Smee ersetzte, wie wir gesehen haben, die Kupferplatte durch platinisiertes Silber, und Walker schlug vor, an Stelle von Kupfer, resp. Silber harte Kohlenplatten zu gebrauchen, da dies billiger wäre und gleichzeitig die elektromotorische Kraft erhöhte. Das einfache Chromsäure-Element (Fig. 72) ist fast das einzige Element mit einer Flüssigkeit, welches frei von Polarisation ist, und selbst bei dieser Form nimmt die Stromstärke nach einer Thätigkeit von wenigen Minuten ab, in Folge der chemischen Zersetzung der Flüssigkeit. Pabst gebraucht ein Eisen-Kohle-Element mit Eisenperchlorid als erregende Flüssigkeit. Das Eisen löst sich auf und es wird zunächst Chlor frei, doch ohne Polarisation; indem die Flüssigkeit durch Absorbierung von Sauerstoff aus der Luft sich wieder erzeugt. Dieses Element ist sehr konstant, doch von geringer E.M.K. Vollständiges Depolarisieren wird gewöhnlich nur bei Elementen mit 2 Flüssigkeiten erzielt, oder bei solchen Elementen, wo ausser der einen Flüssigkeit noch ein depolarisierender fester Körper, wie Braunstein, Kupferoxyd oder Bleisuperoxyd, mit dem Kohlenpole in Berührung steht. Solche Elemente gehören streng genommen aber nicht zu denen mit einer Flüssigkeit, und werden erst in der nächsten Klasse, bei der man 2 Elektrolyten hat, betrachtet.

Elemente mit 2 Flüssigkeiten.

170. Die Daniell'sche Batterie. Jedes Element der Daniell'schen Batterie besteht aus einem innern und einem äussern Becher, die durch eine poröse Scheidewand getrennt sind, damit die Flüssigkeiten der beiden Becher sich nicht mit einander vermischen. Der äussere Becher (Fig. 73) besteht gewöhnlich aus Kupfer und dient gleichzeitig als Kupferplatte. In demselben steht ein cylindrischer Becher von unglasiertem

Digitized by Google

porösem Porzellan, eine sogenannte Thonzelle (ein Becher von Pergament oder auch Löschpapier thut dieselben Dienste) und hierin ein amalgamierter Zinkstab als negativer Pol. Die Flüssigkeit des innern Bechers ist verdünnte Schwefelsäure; die des äussern ist eine gesättigte Kupfervitriollösung; ausserdem enthält ein durchlöchertes Fach am Rande des Bechers einige kleine Krystalle desselben Körpers, damit sie sich auflösen und das, was während der Thätigkeit der Batterie verbraucht wurde, ersetzen können.

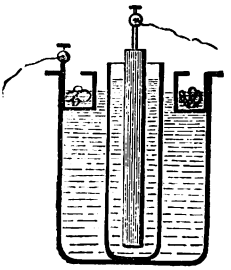

Fig. 73.

Ist der Stromkreis geschlossen, so löst sich das Zink in der verdünnten Säure auf, und wird zu schwefelsaurem Zinkoxyd, während Wasserstoff frei wird. Dieses Gas erscheint jedoch *nicht* in Blasen an der Oberfläche des Kupferbechers, denn da der innere Becher porös ist, so erstrecken sich die molekularen Vorgänge (durch welche die frei gewordenen Atome des Wasserstoffes, wie Fig. 158 veranschaulichen soll, durch die Säure getrieben werden) durch die Poren des innern Bechers und dort werden in der Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd die Wasserstoffatome gegen Kupferatome umgetauscht, so dass sich reines Kupfer, und nicht Wasserstoff an der äussern Kupferplatte absetzt. Chemisch können diese Prozesse in 2 Stufen dargestellt werden.

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$$

Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff.

Und ferner:

$$H_2 + CuSO_4 = H_2SO_4 + Cu$$

Wasserstoff und schwefelsaures Kupferoxyd geben Schwefelsäure und Kupfer.

Der Wasserstoff ist gleichsam auf elektro-chemischem Wege während des Kreislaufs der Umbildungen in Kupfer verwandelt, und während so das Zink sich auflöst, nimmt das Kupfer zu, die verdünnte Schwefelsäure verwandelt sich allmählich in schwefelsaures Zinkoxyd, und das schwefelsaure Kupferoxyd in Schwefelsäure. Es findet also so lange keine Polarisation statt, wie die Kupfervitriollösung genügend gesättigt ist, und die Batterie ist sehr konstant, obgleich nicht durchwegs so konstant wie Clark's Normal-Element, welches in Art. 177 beschrieben ist, weil kleine Aenderungen in der elektromotorischen Kraft dadurch eintreten, dass die Zusammensetzung der zweiten Flüssigkeit sich ändert. Nimmt man Schwefelsäure, welche mit 12 Teilen Wasser verdünnt ist, so beträgt die E.M.K. 1,181 Volt, dagegen 1,047 Volt, wenn man konzentriertes schwefelsaures Zinkoxyd anwendet; 1,07 Volt bei

Digitized by Google

einer halbkonzentrierten Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd und 1,028 Volt oder noch weniger bei den gewöhnlichen Elementen, die mit Wasser oder verdünnter Säure gefüllt sind. In Folge ihrer Beständigkeit hat diese Batterie, in einer geeigneten flachen Form aufgebaut (Fig. 77), vielfache Anwendung in der Telegraphie gefunden.

171. Die Grove'sche Batterie. Wilhelm Grove erfand eine Batterie, welche sich durch grössere E.M.K. sowohl, als auch durch kleinern innern Widerstand vor dem Daniell'schen Elemente auszeichnet. Bei dem Grove'schen Elemente hat man einen äussern Becher von glasiertem Porzellan oder *Ebonit*, welcher eine amalgamierte Zinkplatte und verdünnte Schwefelsäure enthält. In dem innern porösen Becher dient als negativer Pol ein Stück Platinblech, welches in konzentrierte Salpetersäure taucht. Bei diesem Elemente findet keine Polarisation statt, denn der Wasserstoff, welcher durch die Auflösung des Zinks in verdünnter Schwefelsäure frei wird, zersetzt bei seinem Durchgange durch die Salpetersäure, um nach dem Platinpole zu gelangen, die Salpetersäure und wird selbst oxydiert, so dass Wasser und die roten Dämpfe der Untersalpetersäure entstehen. Dieses Gas ruft jedoch keine Polarisation hervor, denn da dasselbe in Salpetersäure sehr leicht löslich ist, so bildet es weder einen Ueberzug auf der Platinplatte, noch erregt es, wie der Wasserstoff, eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft mit dem Zink. Den Grove'schen Elementen kann man eine flache Form geben, indem man das Zink so umbiegt, dass es den platten, porösen Becher auf beiden Seiten umgibt. Dadurch wird der innere Widerstand, der ohnehin schon wegen der guten Leitungskraft der Salpetersäure gering ist, noch kleiner. Deshalb liefert das Grove'sche Element 3 bis 4 Stunden lang einen kräftigen, gleichmässigen Strom. Die E.M.K. eines Elementes beträgt circa 1,9 Volt. Ein einzelnes Element bringt einen 2 bis 3 Zoll langen, dünnen Platindraht sofort zum Rotglühen, oder treibt eine kleine elektro-magnetische Maschine. Um grössere Wirkungen zu erzielen, muss man eine Anzahl von Elementen zu einer »Kette« verbinden, indem man

Digitized by Google

das Platin eines Elementes mit dem Zink des nächst folgenden verbindet. 50 solcher Elemente, von denen jedes ungefähr $\frac{1}{4}$ Liter Flüssigkeit enthält, genügen vollständig, um ein elektrisches Licht zu erzeugen, wie in der XXXII. Vorlesung auseinandergesetzt werden wird.

172. Die Bunsen'sche Batterie. Die nach Bunsen benannte Batterie ist eine Modifikation der Grove'schen, und wurde auch ursprünglich von Grove vorgeschlagen. In dem Bunsenschen Elemente ist das kostspielige [1]) Platinblech durch einen Stab oder eine Platte aus harter Kohle ersetzt. Wegen der Schwierigkeit, dieselbe in dünne Platten zu schneiden, muss man der Batterie statt der flachen Form, eine cylindrische geben, mit einem Kohlenstabe, wie Fig. 74 zeigt. Die Potentialdifferenz für eine Zink-Kohlen-Kombination ist etwas grösser, als für eine solche von Zink-Platin, was von Vorteil ist; aber das Bunsen'sche Element ist schwer in Ordnung zu halten; auch ist es schwierig, eine gute Berührung zwischen der rauhen Oberfläche der Kohle und dem Kupferbügel herzustellen, welcher die Kohle des einen Elements mit dem Zink des nächstfolgenden verbindet. Fig. 75 veranschaulicht die gewöhnliche Art, eine Kette von fünf solchen Elementen zusammenzustellen.

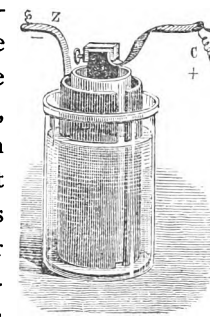

Fig. 74.

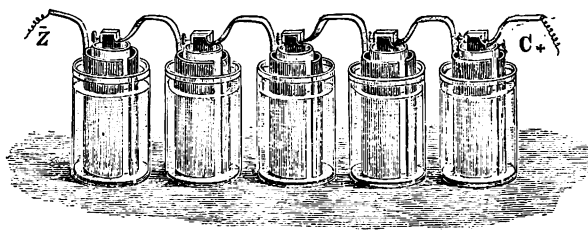

Fig. 75

1) Ein Gramm Platin kostet mehr als eine Mark, nahe halb so viel wie Gold; während man einen Zentner Gaskohle für eine Kleinigkeit bekommt, oft für die blosse Mühe, sie aus den Gasretorten loszuhauen.

Digitized by Google

Die Bunsen'sche Batterie liefert für längere Zeit einen kontinuierlichen Strom als die niedrigen Grove'schen Elemente, wegen der grösseren Quantität Säure, welche die cylindrischen Becher enthalten [1]).

173. Leclanché's Batterie, Niaudet's Batterie. Um elektrische Klingelzüge und Telephone in Betrieb zu setzen, und teilweise auch zum Telegraphieren gebraucht man ein von Leclanché erfundenes Zink-Kohle-Element, bei welchem die erregende Flüssigkeit nicht verdünnte Säure, sondern eine Salmiaklösung ist. In dieser löst sich das Zink auf und bildet Chlorzinkammonium, während Ammoniakgas und Wasserstoffgas am Kohlen Pole frei werden. Zur Vermeidung der Polarisation stellt man die Kohlenplatte in einen porösen Becher, der mit Kohlenstücken und gestossenem Mangansuperoxyd gefüllt ist, einem Körper, welcher seinen Sauerstoff allmählich abgibt und die Wasserstoffblasen zerstört. Benutzt man das Element zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes auf längere Zeit, so nimmt die Kraft des Elements in Folge der Ansammlung der Wasserstoffblasen ab; überlässt man dann dasselbe sich selbst, so gewinnt es wieder seine frühere Stärke, indem das Hyperoxyd nach und nach die Polarisation beseitigt. Da das Element in anderer Beziehung völlig konstant ist, und Monate oder Jahre lang nicht erneuert zu werden braucht, so eignet sich dasselbe vorzüglich zu häuslichen Zwecken. Fig. 76 zeigt 3 zu einer Kette verbundene Elemente von Leclanché. Bei neuern Konstruktionen hat man das Mangansuperoxyd auf der Oberfläche der Kohlenplatte festgepresst, da man auf diese Weise keinen innern porösen Becher nötig hat.

Niaudet hat ebenfalls ein Zink-Kohle-Element konstruiert, bei welchem

1) Callan konstruierte eine grosse Batterie, in welcher Gusseisen als + Pol in starker Salpetersäure stand, während die Zinkplatten in verdünnte Schwefelsäure getaucht waren. Das Eisen wird unter diesen Umständen von der Säure nicht angegriffen, sondern befindet sich in einem sogenannten »passiven Zustande«. Seine Oberfläche scheint alsdann mit einer Schicht von magnetischem Superoxyd oder Sauerstoff überzogen zu sein.

Digitized by Google

das Zink in einer Kochsalzlösung steht und die Kohle von sogenanntem Chlorkalk umgeben ist, welcher beständig Chlor und Sauerstoff ausscheidet,

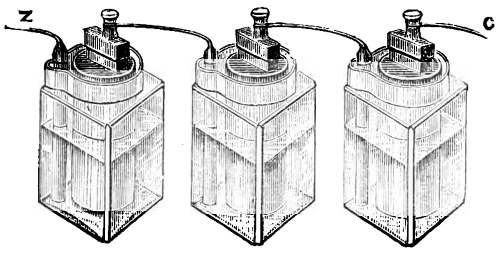

Fig. 76.

so dass diese beiden Körper die Wasserstoffblasen neutralisieren und die Polarisation verhindern. Dieses Element hat eine grössere E.M.K. und einen geringeren Widerstand, als das von Leclanché. De Lalande und Chaperon bringen ein Element in Vorschlag, bei welchem Kupferoxyd als fester Depolarisator in einer Lösung von Aetzkali Anwendung findet.

174. De la Rue's Batterie. De la Rue hat ein vollkommen konstantes Element konstruiert, bei welchem die beiden Metalle Zink und Silber sind. Das Zink taucht in Zinkchlorür, und das Silber ist von geschmolzenem Silberchlorür umgeben. In dem Maasse wie das Zink sich auflöst, sammelt sich metallisches Silber am + Pole an, gerade wie Kupfer im Daniell'schen Elemente. De la Rue konstruierte eine kollossale Batterie von mehr als 11,000 kleinen Elementen. Die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkplatte und der letzten Silberplatte dieser ungeheuern Batterie betrug über 11,000 Volt, und doch sprang vom + Pole zum negativen erst in einer Entfernung von weniger als 0,5 cm ein Funke über. Bei 8040 Elementen betrug die Funkenlänge nur 0,2 cm.

175. Marié Davy's Batterie. Bei diesem Elemente taucht das Zink in schwefelsaures Zinkoxyd, während eine Kohlenplatte in einer breiigen Lösung von schwefelsaurem Quecksilberoxyd steht. Ist das Element in Thätigkeit, so sammelt sich an der Oberfläche der Kohlenplatte Quecksilber an, so dass das Element thatsächlich ein Zink-Quecksilber-Element ist.

Digitized by Google

Dasselbe fand in Frankreich vor Einführung des Leclanché'schen Elementes vielfache Anwendung beim Telegraphieren.

176. Gravitationsbatterieen. Statt einen porösen Becher zu gebrauchen, um die beiden Flüssigkeiten auseinander zu halten, ist es in dem Falle, wo die eine Flüssigkeit schwerer ist, als die andere, auch möglich, den Apparat so einzurichten, dass die schwerere Flüssigkeit die untere Schicht des Bechers bildet und die leichtere auf derselben schwimmt. Solche Apparate heissen *Gravitationsbatterieen;* doch ist die Trennung niemals vollkommen, da die schwere Flüssigkeit in Folge der Diffusion allmählich nach oben steigt. Die Anordnung des Daniell'schen Elementes als Gavitationsbatterie rührt von Meidinger, Minotto, Callaud und W. Thomson her. Von Siemens wurde das Daniell'sche Element so abgeändert, dass die beiden Flüssigkeiten durch Gazezeug getrennt wurden. Die »Sägemehl-Batterie« von W. Thomson ist eine Daniell'sche Batterie, bei welcher die Becher mit Sägemehl gefüllt sind, um dieselben vor Zerstörung zu schützen und um sie bequem transportieren zu können.

177. Latimer Clark's Normal-Element. Ein Normal-Element, dessen E.M.K. noch konstanter ist, als diejenige des Daniell'schen, wurde von Latimer Clark erfunden. Diese Batterie besteht aus reinem Quecksilber, auf welchem eine Masse von schwefelsaurem Quecksilberoxyd schwimmt, welche wieder eine Zinkplatte trägt. Die Berührung mit dem Quecksilber, welches als + Pol dient, wird durch einen Platindraht hergestellt. Die E.M.K. beträgt 1,436 Volt.

178. Die folgende Tabelle gibt die elektromotorischen Kräfte der aufgezählten Elemente an:

Digitized by Google

Name des Elementes.	E.M.K. in Volts.
Elemente mit einer Flüssigkeit.	
Volta (Wollaston, etc.) . . .	1,036—0,81
Smee	0,64 ?
Poggendorff (Grenet, Trouvet etc.)	2,27—1,77
Pabst	0,78
Elemente mit 2 Flüssigkeiten.	
Daniell (Meidinger, Minotto, Thomson etc.)	1,122—1,07—1,047—1,028
Grove	1,934—1,76
Bunsen	1,942—1,73
Leclanché	1,59—1,46—1,402
Niaudet	1,63
Lalande und Chaperon . .	0,66
De la Rue	1,046
Marié Davy	1,50
Latimer Clark (Normal.) . .	1,436
Sekundär-Batterieen.	
Ritter	2,22—1,47
Planté (Faure, Sellon etc.) .	2,22—1,96

179. Stromstärke. Der Leser darf die Ziffern der obigen Tabelle nicht mit der Stärke des Stromes verwechseln, welchen die verschiedenen Elemente liefern; diese hängt, wie in der 13. Vorlesung bemerkt wurde, sowohl von dem innern *Widerstande* der Elemente, als auch von ihrer E.M.K. ab. Die E.M.K. eines Elementes ist von der Grösse desselben unabhängig und wird nur durch die gewählten Substanzen und die Beschaffenheit derselben bestimmt. Der Widerstand hängt von der Grösse des Elements ab, von der Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit,

Digitized by Google

von der Dicke der Flüssigkeitsschicht, welche der Strom durchdringen muss u. s. w.

Die exakte Definition für die **Stromstärke** ist die folgende: *Die Stromstärke ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in einer Sekunde durch einen Querschnitt des Schliessungsbogens hindurchfliesst* [1]).

Nehmen wir an, dass während 10 Sekunden 25 *Coulomb* Elektrizität durch einen Schliessungsbogen fliessen, so beträgt die Durchschnittsstärke jenes starken Stromes innerhalb jener Zeit $2\frac{1}{2}$ *Coulomb* pro Sekunde, oder $2\frac{1}{2}$ *Ampère*. Die gewöhnliche Stromstärke beim Telegraphieren auf weite Strecken beträgt nur 0,005 bis 0,01 *Ampère*.

Wenn in t Sekunden die Elektrizitätsmenge Q durch den Schliessungsbogen fliesst, so findet man die Stromstärke C für jene Zeit nach der Formel:

$$C = \frac{Q}{t}.$$

Weiter findet man die ganze Elektrizitätsmenge, welche in einer bestimmten Zeit t durch den Schliessungsbogen strömt, wenn man die Stromstärke mit der Zeit multipliziert, d. h.

$$Q = C \cdot t.$$

Denn die Elektrizitäts-Menge, welche auf diese Weise fortgeleitet wird, ist der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fliesst, proportional.

Die Gesetze, welche die Stromstärke in einem Stromkreise bestimmen, wurden zuerst von Dr. G. S. Ohm angegeben, welcher sie im folgenden Gesetze zusammenfasste:

1) Die Ausdrücke »stark, gross und intensiv«, welche in Bezug auf Ströme gebraucht werden, bezeichnen genau dasselbe. In frühern Zeiten, als das Ohm'sche Gesetz noch nicht richtig erkannt war, pflegten die Elektriker von »Massenströmen« und »Intensitätsströmen« zu sprechen; mit dem erstern Ausdruck bezeichneten sie einen Strom, der durch einen Schliessungsbogen floss, dessen Widerstand sowohl innerhalb, wie ausserhalb der Batterie sehr gering war; und mit dem letztern Ausdrucke bezeichneten sie einen Strom, der von einer grossen elektromotorischen Kraft erzeugt wurde. Die Ausdrücke waren bequem, sollten jedoch vermieden werden, da sie zu Missverständnissen führen.

Digitized by Google

180. Das Ohm'sche Gesetz. *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional,* oder mit andern Worten, alles, was die E M.K. des Elements vergrössert, erhöht die Stromstärke, während alles, was den Widerstand erhöht (entweder den innern Widerstand in den Elementen selbst oder den Widerstand der äussern Drähte des Schliessungsbogens), die Stromstärke verringert. (Genaueres über das Ohm'sche Gesetz findet sich in der 29. Vorlesung.)

Die innern Widerstände der aufgezählten Elemente sind nun sehr von einander verschieden und richten sich ausserdem nach der Grösse derselben. Im Allgemeinen können wir sagen, dass der Widerstand eines Daniell'schen Elementes ungefähr das 5fache desjenigen eines Grove'schen Elementes von gleicher Grösse beträgt. Das Grove'sche Element besitzt also sowohl eine grössere E.M.K. als auch einen geringern innern Widerstand. Dasselbe liefert in der That bei einem kurzen dicken Drahte einen circa 8mal stärkern Strom als ein Daniell'sches Element von gleicher Grösse.

181. Wir können demnach die Stärke einer Batterie auf doppelte Weise vergrössern:

1) indem wir ihre E.M.K. erhöhen,

2) indem wir ihren innern Widerstand verringern.

Da die elektromotorische Kraft eines Elementes durch das dazu verwandte Material bestimmt wird, so ist das einzige Mittel, die gesamte E.M.K. einer Batterie aus gegebenem Material zu erhöhen, dies, dass man die Anzahl der zu einer Kette vereinigten Elemente vergrössert. Im Telegraphendienste ist es üblich, 2 bis 300 der niedrigen Daniell'schen Elemente auf diese Weise zusammen zu ketten; und sie werden gewöhnlich in trogähnlichen Kasten aufgestellt, welche eine Reihe von 10 Elementen enthalten, wie Fig. 77 zeigt.

Um den innern Widerstand eines Elementes zu verringern, kann man folgende Mittel anwenden:

1) Man kann die Platten näher zusammenstellen, so dass

Digitized by Google

der Strom eine weniger dicke Flüssigkeitsschicht zu durchsetzen hat.

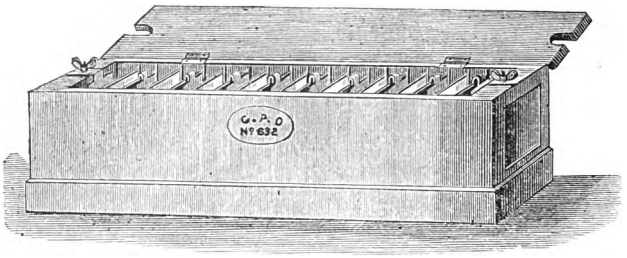

Fig. 77.

2) Man kann grössere Platten nehmen, da dem Strome dann gewissermaassen mehr Wege durch die Flüssigkeitsschicht geboten sind.

3) Man kann die Zinkplatten mehrerer Elemente mit einander verbinden, so dass sie gleichsam eine grosse Zinkplatte bilden, und ebenso die Kupferplatten. Auf diese Weise verbundene Elemente nennt man »parallel geschaltet«, oder »auf Quantität« verbundene Elemente, zum Unterschiede von der Anordnung der Elemente in einfachen Reihen. Nehmen wir z. B. an, dass vier gleiche Elemente auf diese Weise verbunden sind, so hat der Strom eine 4mal so grosse Anzahl von möglichen Wegen, auf denen er durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer gelangen kann; daher ist dann der innere Widerstand des ganzen Apparates nur der vierte Teil von dem eines einzelnen Elementes. Aber die E.M.K. der 4 Elemente ist dann nicht grösser, als diejenige eines einzigen Elementes.

Es ist höchst wichtig zu beachten, dass die Stromstärke auch durch die Widerstände der Drähte des äussern Schliessungsbogens beeinflusst wird; und wenn der äussere Widerstand ohnehin schon gross ist, wie z. B. beim Telegraphieren auf grosse Entfernungen, so nützt es wenig, den innern Widerstand zu verringern, wenn derselbe bereits bedeutend geringer ist, als der Widerstand der Drahtlinie.

Digitized by Google

Die E.M.K. der nur eine Flüssigkeit enthaltenden Elemente von Volta und Smee ist als unzuverlässig zu bezeichnen, denn die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. der Polarisation tritt so schnell auf, dass die wahre E.M.K. des Elements kaum gemessen werden kann. Die verschiedenen Werte, welche andern Elementen beigelegt werden, finden ihre Erklärung in den verschiedenen Graden der Konzentration der Flüssigkeiten. So wird z. B. bei den zur Telegraphie benutzten Daniell'schen Elementen anfangs bloss Wasser in die die Zinkplatten enthaltenden Becher gegossen; und ihre E.M.K. ist geringer, als in dem Falle, wo man dem Wasser eine Säure oder schwefelsaures Zink beimischt.

182. Andere Batterieen. Von verschiedenen Physikern sind eine Menge anderer Formen galvanischer Elemente erfunden worden. Unter ihnen finden sich 2 von nur theoretischem Interesse, bei denen die elektromotorische Kraft nicht von Potentialdifferenzen bei der Berührung verschiedener *Metalle,* sondern von Potentialdifferenzen bei der Berührung eines oder mehrerer Metalle mit Flüssigkeiten herrührt. Die erste dieser Batterieen erfand der Kaiser Napoleon III. Beide Platten waren von Kupfer und tauchten in Lösungen von verdünnter Schwefelsäure, resp. von Natronlauge, welche durch eine poröse Scheidewand von einander getrennt waren. Die zweite Batterie rührt von Wöhler her; dieselbe besteht nur aus 2 Aluminium-Platten, welche in starke Salpetersäure, resp. Natronlauge tauchen.

Bennett hat jüngst eine wohlfeile und höchst wirksame Batterie beschrieben, bei welcher Eisen und Zink als Metalle, und eine starke Natronlauge als erregende Flüssigkeit Verwendung finden. Alte, mit Eisenfeilspähne gefüllte Fleischbüchsen eignen sich gut als positives Element, und können die Lösung enthalten. Kleine Zinkstücke, welche in Quecksilber tauchen, das sich in einem innern, niedrigen Porzellanbecher befindet, bilden den negativen Pol.

Skrivanoff hat das Zink-Kohle-Element von Latimer Clark dahin abgeändert, dass er einen steifen, aus Ammonium-Quecksilberchlorid und Kochsalz zusammengesetzten Teig anwandte und dadurch die Elemente trocken und transportabel machte.

Jablochkoff hat eine Batterie beschrieben, bei welcher Platten aus Kohlen und Eisen in geschmolzenem Salpeter stehen; die Kohle ist hier das elektro-positive Element, indem dieselbe in der Flüssigkeit schnell verbraucht wird.

Digitized by Google

Die Beschreibung der *Sekundär-Batterieen* von Planté und Faure und der Grove'schen *Gasbatterie* findet sich Art. 415 und 416.

Beachtung verdient noch die sogenannte *trockene Säule* von Zamboni. Dieselbe besteht aus einer Anzahl von Papierscheiben, welche auf der einen Seite mit Zinkfolie und auf der andern mit Mangansuperoxyd belegt sind. Mehrere 1000 dieser Scheiben sind innerhalb einer Glasröhre über einander geschichtet. Ihr innerer Widerstand ist sehr bedeutend, da der innere Leiter die Feuchtigkeit des Papiers, und diese gering ist; dagegen ist ihre elektromotorische Kraft sehr gross, und eine gute trockene Säule liefert Funken. Es vergehen viele Jahre, ehe das Zink vollständig oxydiert oder das Mangan verbraucht ist. Im Clarendon-Laboratorium zu Oxford befindet sich eine trockene Säule, deren Pole 2 Metallglocken sind; zwischen ihnen hängt eine kleine Messingkugel, welche durch Hin- und Herschwingen die Elektrizität langsam entladet. Die Glocken läuten fortwährend schon seit mehr als 40 Jahren.

183. Einfluss der Wärme auf Batterieen. Wird ein Element erwärmt, so liefert es einen stärkern Strom als bisher. Dies rührt hauptsächlich von dem Umstande her, dass die Flüssigkeiten, wenn sie erwärmt werden, besser leiten, so dass der innere Widerstand des Elementes dadurch geringer wird. Auch bemerkt man beim Erhitzen eine geringe Änderung in der E.M.K. So steigt z. B. die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes um circa $1\frac{1}{2}$ %, wenn dasselbe auf die Temperatur des siedenden Wassers erhitzt wird, während diejenige einer Bichromat-Batterie unter gleichen Umständen um 2 % abnimmt.

XVI. VORLESUNG: *Magnetische Wirkungen des Stromes.*

184. Um das Jahr 1802 entdeckte Romagnosi in Trient, dass eine Volta'sche Säule einen Einfluss auf die Magnetnadel ausübt, und dieselbe aus ihrer gewöhnlichen Stellung ablenkt. Diese Entdeckung fiel jedoch der Vergessenheit anheim und wurde niemals veröffentlicht. Einen Zusammenhang irgend wel-

Digitized by Google

cher Art zwischen Magnetismus und Elektrizität hatte man schon längst vermutet. So hatte man beobachtet, dass der Blitz Messer und andere Gegenstände aus Stahl magnetisiert; doch waren fast alle Versuche, diese Wirkungen durch kräftige elektrische Ladungen oder dadurch hervorzubringen, dass man elektrische Ströme durch Stahlstäbe schickte, fehlgeschlagen [1]). Der wahre Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität blieb unentdeckt.

Im Jahre 1819 zeigte Oerstedt aus Kopenhagen, dass ein Magnet sich rechtwinklig zu einem Drahte zu stellen strebt, durch welchen ein elektrischer Strom geführt wird. Er fand auch, dass die Richtung, nach welcher sich die Nadel aus ihrer gewöhnlichen Lage wendet, ob nach der rechten oder linken Seite, von der Lage des den Strom führenden Drahtes abhängt — ob sich derselbe oberhalb oder unterhalb der Nadel befindet — und von der Richtung, in welcher der Strom durch den Draht fliesst.

185. Oerstedt's Versuch. Es genügt ein sehr einfacher

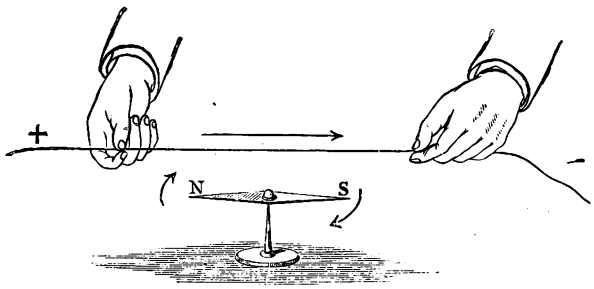

Fig. 78.

Apparat, um den Fundamentalversuch zu wiederholen. Man lasse eine Magnetnadel auf einer Spitze balancieren (Fig. 78)

1) Bis zu dieser Stelle der Vorlesungen ist von keinem Zusammenhange zwischen Elektrizität und Magnetismus die Rede gewesen, obgleich wir uns schon mit jener wie mit diesem beschäftigt haben. Derjenige Leser, welcher sich nicht daran erinnert, ob eine elektrische Ladung einen Magnet affiziert oder nicht, möge das in Art. 91 Gesagte wieder durchlesen.

Digitized by Google

und halte über dieselbe und parallel zu ihr einen starken Kupferdraht, dessen eines Ende mit dem einen Pole einer Batterie von 1 bis 2 Elementen in Verbindung steht. Mit dem andern Ende des Drahtes berühre man alsdann den andern Pol der Batterie. Sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, fliesst ein Strom durch den Draht und die Nadel wird sogleich aus ihrer Lage abgelenkt. Fliesst der Strom durch den Draht *oberhalb* der Nadel in der Richtung von Norden nach Süden, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach Osten abgelenkt; fliesst der Strom in dem Drahte von Süden nach Norden, so wird derselbe Pol der Nadel nach Westen abgelenkt. Wird jedoch der Draht *unterhalb* der Nadel gehalten, so sind die Ablenkungen umgekehrt, d. h. durch einen von Norden nach Süden fliessenden Strom wird der nordsuchende Pol nach Westen abgelenkt.

186. Ampère's Regel. Um diese Ablenkungen dem Gedächtnisse einzuprägen, hat Ampère folgende seltsame, aber sehr brauchbare Regel aufgestellt: *Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er sein Gesicht der Nadel zukehrt, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach* links *abgelenkt.* Mit andern Worten: Die Ablenkung des nordsuchenden Pols einer Magnetnadel, welche von dem Leiter aus betrachtet wird, ist nach der linken Seite des Stromes gerichtet.

Für gewisse besondere Fälle, wo ein *fester* Magnetpol auf einen *beweglichen* Strom wirkt, ist folgende *Umkehrung der Ampère'schen Regel* sehr bequem. Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er längs der Richtung der Kraftlinien des Magnetpols blickt (d. h. wie die Kraftlinien verlaufen, vom Pole weg, wenn es der nordsuchende, zum Pole hin, wenn es der südsuchende ist), dann wird er und mit ihm der leitende Draht nach *links* abgelenkt.

187. Wenn ein Strom *unterhalb* der Nadel in der einen Richtung und dann *oberhalb* derselben in entgegengesetzter Richtung geführt wird, indem man den Draht umbiegt (Fig. 79), so ergibt eine einfache Ueberlegung, dass die Kräfte, welche die beiden Teile des Stromes auf die Nadel ausüben, dieselbe Rich-

Digitized by Google

tung haben. Denn ist *a* der nordsuchende und *b* der südsuchende Pol der schwebenden Nadel, so ist der Strom in dem untern Teile des Drahtes bestrebt, die Nadel so zu drehen, dass sich *a* dem Beobachter nähert, während *b* zurückgeht; und der oberhalb fliessende Strom, welcher ebenfalls den nordsuchenden Pol nach links ablenkt, strebt in gleicher Weise *a* nach dem Beobachter zu treiben, und *b* von ihm weg. Die Nadel stellt sich nicht genau rechtwinklig zu der Richtung des leitenden Drahtes, sondern bleibt in schiefer Lage stehen. Die richtenden Kräfte des Erdmagnetismus streben die Nadel so zu stellen, dass sie von Norden nach Süden zeigt. Der elektrische Strom strebt dagegen der Nadel die Richtung von Osten nach Westen zu geben. Die Richtung der Resultierenden liegt zwischen diesen Richtungen und hängt von der relativen Stärke der beiden wirkenden Kräfte ab. Ist der Strom sehr stark, so wird die Nadel bedeutend abgelenkt; dieselbe könnte jedoch höchstens um einen rechten Winkel abgelenkt werden, wenn der Strom unendlich stark wäre. Ist jedoch der Strom schwach, im Vergleich zu der richtenden Kraft des Magnetismus, so wird die Nadel nur unbedeutend abgelenkt.

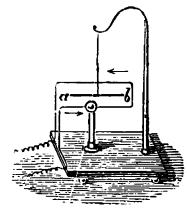

Fig. 79.

188. Eine solche Vorrichtung kann daher als **Galvanoskop** oder Stromanzeiger dienen; denn die Bewegung der Nadel zeigt die Richtung des Stromes und gibt an, ob derselbe stark oder schwach ist. Dieser Apparat ist indessen zu unempfindlich, um sehr schwache Ströme anzuzeigen. Um ein empfindlicheres Instrument zu erhalten, kann man zwei verschiedene Wege einschlagen: 1) Man kann die wirksame Kraft des Stromes dadurch erhöhen, dass man den Draht mehrere Male um die Nadel herum führt. 2) Man kann die dem Strome entgegenwirkende, richtende Kraft des Erdmagnetismus durch eine kompensierende Vorrichtung vermindern.

189. Schweigger's Multiplikator. Das erste der obigen Mittel wurde von Schweigger angewandt, welcher einen *Multi-*

Digitized by Google

plikator von zahlreichen Drahtwindungen konstruierte. Ein passender Rahmen aus Holz, Metall oder Ebonit wird zur Aufnahme des Drahtes zubereitet; dieser letztere muss jedoch »isoliert«, d. h. mit Seide, Baumwolle oder Guttapercha umwickelt werden, damit die einzelnen Windungen der Rolle einander nicht berühren. Innerhalb dieses Rahmens, welcher kreisförmig oder elliptisch sein oder, was gebräuchlicher ist, die Form eines Rechtecks haben kann, wie in Fig. 80, wird die Nadel aufgehängt, wobei der Rahmen so gestellt wird, dass die Drahtwindungen im magnetischen Meridiane liegen. Je grösser die Anzahl der Windungen ist, um so kräftiger ist die Ablenkung des Magnets, welche ein und dieselbe Elektrizitätsmenge bei ihrem Durchfliessen durch die Windungen hervorruft. Ist jedoch der Draht dünn, oder die Anzahl der Drahtwindungen sehr gross, so kann der Widerstand, welchem die strömende Elektrizität begegnet, die Stärke des Stromes bedeutend beeinträchtigen. Der Leser wird die Wichtigkeit dieser Bemerkung begreifen, wenn er das Kapitel über das Ohm'sche Gesetz gelesen hat.

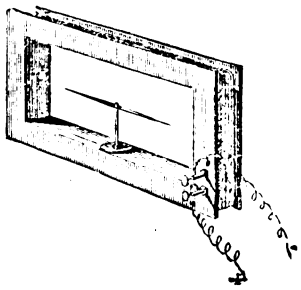

Fig. 80.

190. Astatische Verbindungen. Die richtende Kraft, welche der Erdmagnetismus auf eine Magnetnadel ausübt, kann durch eine der beiden folgenden Methoden reduziert oder beseitigt werden:

a) Durch Anwendung eines *kompensierenden Magnets.* Hält man einen gewöhnlichen, langen Stabmagnet horizontal in den magnetischen Meridian, doch so, dass sein nordsuchender Pol nach Norden gerichtet ist, so veranlasst derselbe eine über oder unter ihm schwebende Magnetnadel, sich mit ihrem südsuchenden Pole nach Norden einzustellen. Befindet sich der Stabmagnet in unmittelbarer Nähe der Nadel, so kann er die richtende Kraft der Erde überwinden und die Nadel veran-

Digitized by Google

lassen, sich umgekehrt wie gewöhnlich einzustellen. Befindet er sich in grösserer Entfernung, so kann derselbe die richtende Kraft der Erde bloss schwächen. In einer bestimmten Entfernung wird der Magnet diese Kraft gerade aufheben, so dass die Nadel dann neutral ist. Von dieser Anordnung zur Schwächung der richtenden Kraft der Erde macht man beim Spiegel-Galvanometer (Fig. 91) Gebrauch, bei welchem der oben angebrachte Magnet, welcher gekrümmt ist und in beliebiger Höhe befestigt werden kann, ein Mittel gewährt, dem Apparate den gewünschten Grad von Empfindlichkeit zu verleihen, indem man den Magnet höher oder tiefer stellt.

b) Durch Anwendung eines *astatischen Paares* von Magnetnadeln. Werden zwei magnetisierte Nadeln von gleicher Stärke und Grösse durch einen dünnen Messing- oder Aluminiumdraht in umgekehrter Ordnung mit einander verbunden (Fig. 81), so wird der Kraft, welche die eine Nadel in den magnetischen Meridian zu stellen strebt, von der auf die andere Nadel wirkenden Kraft genau das Gleichgewicht gehalten. Folglich bleibt dieses Nadelpaar in jeder ihm gegebenen Stellung stehen, und ist vom Erdmagnetismus unabhängig. Eine solche Verbindung ist unter dem Namen **astatisches Paar** bekannt. In der Praxis ist es jedoch schwierig, ein vollkommen astatisches Paar herzustellen, da es nicht leicht ist, zwei Nadeln bis zu genau demselben Grade zu magnetisieren; auch ist es schwierig, sie ganz genau parallel zu einander zu befestigen. Ein solches astatisches Paar wird sofort durch einen Strom abgelenkt, welcher durch einen um eine der Nadeln gerollten Draht fliesst; denn wie Figur 82 zeigt, dreht der Strom, welcher oberhalb der einen Nadel und unterhalb der andern fliesst, beide in demselben Sinne, da sie sich bereits in umgekehrter Lage befinden. Man kann sogar noch weiter gehen und den Draht um beide Nadeln führen, indem

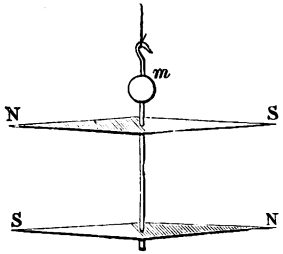

Fig. 81.

Digitized by Google

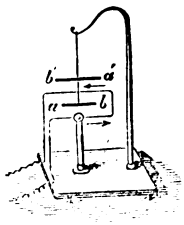

Fig. 82.

man den Draht um die obere Nadel im entgegengesetzten Sinne, wie um die untere Nadel windet.

Nobili wandte ein astatisches Nadelpaar in Schweigger's Multiplikator an und konstruierte auf diese Weise einen höchst empfindlichen Apparat, das *astatisthe Galvanometer* (Fig. 88). Die Beschreibung der besonderen Galvanometerformen, welche zur Strommessung geeignet sind, findet sich in der nächsten Vorlesung.

191. Erzeugung eines magnetischen Feldes durch einen Strom. Fliesst ein Strom durch einen Kupferdraht, so ist derselbe im Stande, wie Arago fand, Eisenfeilspäne anzuziehen, so lange der Strom durch ihn hindurchfliesst. Diese Eisenfeilspäne stellen sich rechtwinklig zum Drahte und haften rings um denselben, fallen jedoch ab, sobald der Schliessungskreis unterbrochen wird. Es wird also rings um den den Strom leitenden Draht ein magnetisches Feld erzeugt, und es ist von Wichtigkeit, zu untersuchen, in welcher Weise die Kraftlinien in diesem Felde verteilt sind.

Angenommen, der Punkt in der Mitte von Fig. 83 stelle den Querschnitt des Drahtes vor, und der Strom hätte die Richtung vom Leser zum Papiere. Dann ist nach der Ampèreschen Regel eine darunter gehaltene Magnetnadel bestrebt, sich in die angegebene Lage einzustellen, mit ihrem N-Pole nach links weisend [1]). Eine Nadel oberhalb des Drahtes stellt der

1) Wenn der Leser irgend welcher Schwierigkeit begegnet, die Ampèresche Regel auf diesen und die folgenden Fälle anzuwenden, so sollte er genau an folgender Vorstellung festhalten. Der mit »in« markierte Punkt möge eine Oeffnung im Boden darstellen, in welche der Strom hineinfliesst, und in welche der Leser mit dem Kopfe voran hineinfährt. So lange er sich in der Oeffnung befindet, muss er sich so wenden, dass er jeden der Magnete der Reihe nach ansieht, und sich erinnern, dass in jedem Falle der nordsuchende Pol nach seiner Linken abgelenkt wird. Bei Fig. 84 muss er sich vorstellen, als käme er aus der Oeffnung heraus, wo der Strom aus dem Boden ausfliesst.

Digitized by Google

Strom in die entgegengesetzte Lage. Eine Nadel zur Rechten des Stromes stellt sich rechtwinklig zum Strome (d. h. in die Ebene des Papiers), mit ihrem N-Pole nach unten gerichtet, während der N-Pol einer Nadel zur Linken nach oben gerichtet sein würde. In der That würde der N-Pol um den Konduktor in demselben Sinne gedreht werden, in welchem sich die Zeiger einer Uhr bewegen; während der S-Pol im entgegengesetzten Sinne gedreht werden würde. Fliesst der Strom umgekehrt, d. h. in der Richtung zum Leser, so dass er aus der Ebene des Papiers heraustritt, wie in Fig. 84, so würden die Bewegungen gerade in umgekehrter Weise erfolgen. Daraus scheint zu folgen, dass der nordsuchende Pol eines Magnets sich beständig rings um einen Strom drehen müsste; da es jedoch nicht möglich ist, einen Magnet mit bloss einem Pole herzustellen, und da der südsuchende Pol im entgegengesetzten Sinne getrieben wird, so ist die ganze Wirkung die, dass sich die Nadel in die Richtung einer Tangente an einen den Konduktor einschliessenden Kreis einstellt. Dies hatte Oerstedt im Sinne, wenn er von dem »drehenden Einflusse« des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel sprach. Das Kraftfeld mit seinen kreisförmigen Linien, welche einen in einem geradlinigen Konduktor fliessenden Strom umgeben, lässt sich experimentell mit Eisenfeilspänen auf folgende Weise untersuchen: Man befestigt ein Kartenblatt horizontal und führt durch eine Oeffnung in demselben einen starken vertikalen Kupferdraht (Fig. 85). Dann siebt man Eisenfeilspäne über das Blatt (wie in Art. 108 beschrieben) und sendet einen starken Strom von 3 bis 4 grossen Elementen durch den Draht. Klopft man dann leise auf das Blatt, so gruppieren sich die in der Nähe des Drahtes befindlichen Späne in konzentrischen Kreisen um denselben.

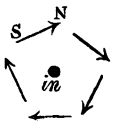

Fig. 83.

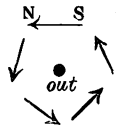

Fig. 84.

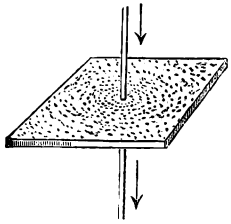
Fig. 85.

Digitized by Google

192. Aequivalente, magnetische Schale (Doppelfläche); Ampère's Theorem. Für viele Zwecke ist die folgende Vorstellungsweise von der magnetischen Wirkung elektrischer Ströme geeigneter als die vorhergehende. Man verbinde die Enden einer Batterie durch einen Schliessungsdraht, welchen man, wie in Fig. 86, an einer Stelle zu einer Schlinge

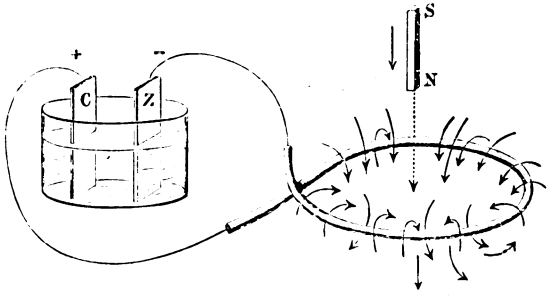

Fig. 86.

umbiegt. Dann ergibt sich, dass der ganze von der Schlinge begrenzte Raum magnetische Eigenschaften besitzt. Wir wollen annehmen, dass der Strom in unserer Figur, von oben gesehen, in derselben Richtung durch die Schlinge fliesst, wie die Zeiger einer Uhr sich bewegen; eine im Drahte schwimmend gedachte Person, welche stets nach dem Mittelpunkte der Schlinge sieht, würde mit dem linken Arme nach unten zeigen. Folglich würde nach der Ampère'schen Regel ein N-Pol nach unten durch die Schlinge getrieben werden, ein S-Pol dagegen nach oben. In der That verhält sich der von der Schlinge des Drahtes begrenzte Raum wie eine *magnetische Schale* (vergl. Art. 107), welche an ihrer oberen Seite südsuchenden Magnetismus und an ihrer untern Seite nordsuchenden Magnetismus enthält. In jedem Falle lässt sich darthun, dass *ein geschlossener Volta'scher Bogen gleichbedeutend ist mit einer magnetischen Schale, deren Ränder mit dem Stromkreis zusammenfallen*, wobei die Stärke der Schale derart ist, dass die Anzahl ihrer Kraftlinien gleich der Anzahl der Kraftlinien ist, welche von dem im Bogen fliessen-

Digitized by Google

den Strome herrühren. Der Stromkreis wirkt auf einen Magnet anziehend oder abstossend, und wird selbst von einem Magnet angezogen oder abgestossen, genau so, wie sich eine äquivalente magnetische Schale verhalten würde.

193. Maxwell's Regel. Professor Clerk Maxwell, welcher diese Methode, den Gegenstand zu behandeln, entwickelte, stellte folgende elegante Regel auf, um die gegenseitige Wirkung eines Stromes und eines in seiner Nähe befindlichen Magnets zu bestimmen. *Auf jeden Teil des Schliessungsbogens wirkt eine Kraft, welche ihn so zu richten strebt, dass derselbe innerhalb seiner Begrenzung die grösstmögliche Anzahl von Kraftlinien einschliesst.* Ist der Schliessungsbogen fest und der Magnet beweglich, so ist die auf den Magnet wirkende Kraft ebenfalls derart, dass sie die Anzahl der durch den Schliessungsbogen gehenden Kraftlinien zu einem Maximum zu machen sucht. (Vergl. auch Art. 317.)

194. De la Rive's schwimmende Batterie. Die vorstehenden Bemerkungen lassen sich experimentell mit Hilfe einer kleinen schwimmenden Batterie darthun. Eine Zinkplatte

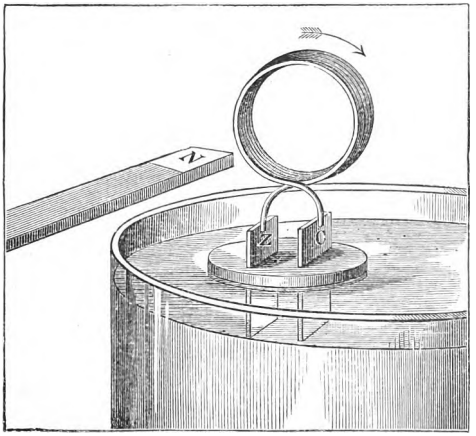

Fig. 87.

und eine Kupferplatte (Fig. 87) werden parallel zu einander in einem grossen Korke befestigt und ihre oberen Enden durch

Digitized by Google

eine kreisförmig gebogene Rolle aus bewickeltem Kupferdrahte verbunden. Beide Platten schwimmen auf einer mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Schale. Wird dem Ringe der eine Pol eines Stabmagnets genähert, so wird derselbe angezogen oder abgestossen, je nachdem es ein N-Pol oder S-Pol ist. Der schwimmende Schliessungsbogen verhält sich wie der schwimmende Magnet in Fig. 44, nur dass wir hier einen Apparat haben, der einer schwimmenden magnetischen Schale äquivalent ist. Wird der S-Pol des Magnets derjenigen Seite des Ringes genähert, welche als ein südsuchender Pol wirkt (d. h. derjenigen Seite, durch welche der Strom in der Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers fliesst), so stösst er dieselbe ab. Wird der Pol mitten in den Ring gehalten, so wird die Batterie kräftig abgestossen, schwimmt fort und wendet sich so, dass sie dem S-Pole des Magnets ihre nordsuchende Seite zukehrt. Dann wird diese angezogen und die Batterie bewegt sich derart, dass die Mitte des Magnets sich innerhalb des Ringes befindet, in welcher Lage möglichst viele Kraftlinien die Ringfläche durchkreuzen.

Es lässt sich auch nachweisen, dass zwei von elektrischen Strömen durchflossene Schliessungsbögen einander anziehen und abstossen, gerade wie 2 magnetische Schalen es thun würden.

In der 26. Vorlesung über Elektromagnete wird gezeigt werden, wie man ein Stück Eisen oder Stahl magnetisieren kann, wenn man dasselbe mit einem spiralförmig gewundenen Drahte umgibt und durch diesen einen Strom schickt.

195. Stromstärke im magnetischen Maasse. Wenn ein Strom auf diese Weise auf einen in seiner Nähe befindlichen Magnetpol wirkt, so ist die von ihm ausgeübte Kraft f der Stromstärke i, der Stärke m des Magnetpols und der Länge l des benutzten Drahtes proportional; dagegen umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes r des Magnetpols vom Schliessungsbogen. Oder $f = \frac{ilm}{r^2}$ Krafteinheiten. Ist der Draht in Gestalt eines Kreises um den Magnetpol geführt, so

Digitized by Google

ist $l = 2\pi r$ und $f = \frac{2\pi i}{r} \cdot m$ Krafteinheiten. Nimmt man ferner an, dass der Radius des Kreises = 1 cm ist, und dass die Stärke des Magnetpols gleich einer Einheit ist (vergl. Art. 125) so ist die Kraft, welche der Stromstärke i entspricht, $\frac{2\pi i}{1} \times 1 = 2\pi i$ Krafteinheiten. Damit also ein Strom von der Stärke i eine Kraft von i Einheiten auf den Einheitspol ausübt, muss man sich denken, dass der Strom nur $\frac{1}{2\pi}$tel des Kreises durchfliesst, oder einen Bogen, dessen Länge gleich dem Radius ist.

196. Einheit der Stromstärke. Man sagt, ein Strom habe die Stärke einer »absoluten« Einheit, wenn derselbe so beschaffen ist, dass derselbe beim Durchfliessen eines Drahtes von einem Zentimeter Länge, der einen Bogen eines Kreises von 1 cm Radius bildet, auf einen Magnetpol von der Stärke 1, welcher sich im Mittelpunkte des Bogens befindet, eine Krafteinheit ausübt. Die praktische Einheit »eines *Ampère*« beträgt nur den 10. Teil dieser theoretischen Einheit. (Vergl. auch Art. 323.)

XVII. VORLESUNG: *Von den Galvanometern.*

197. Mit dem Ausdrucke **Galvanometer** wird ein Apparat bezeichnet, mit welchem man die Stärke elektrischer Ströme durch die Ablenkung einer Magnetnadel misst, um welche der Strom durch eine Drahtrolle herumfliesst. Die einfache, in Art. 188 beschriebene Vorrichtung wurde ein »Galvanoskop« oder *Stromanzeiger* genannt; dieselbe konnte aber füglich nicht »Galvanometer« [1]) oder *Strommesser* genannt werden, da ihre An-

1) Bisweilen nennt man diese Apparate noch »Rheoskop« und »Rheometer«. Ein Stromunterbrecher wird häufig ein »Rheotom« genannt, und der in Fig. 149 abgebildete Kommutator oder Stromwender heisst in einigen

Digitized by Google

gaben nur qualitativ und nicht quantitativ waren. Die Angaben der Nadel gewährten keine genaue Kenntnis von der Stärke des durch den Apparat fliessenden Stromes. Ein gutes Galvanometer muss die wesentliche Bedingung erfüllen, dass die Stromstärke durch seine Angaben in zuverlässiger Weise wirklich *gemessen* wird. Auch sollte dasselbe für die zu messenden Ströme eine hinreichende Empfindlichkeit besitzen. Das Galvanometer, welches zur Messung sehr kleiner Ströme tauglich ist (etwa eines Stromes von nur 1 bis 2 Milliontel eines *Ampère*), ist zur Messung sehr starker Ströme, wie dieselben zur Erzeugung des elektrischen Lichtes gebraucht werden, nicht geeignet. Befindet sich in dem Schliessungsbogen des zu messenden Stromes schon ein grosser Widerstand (wie z. B. ein mehrere Meilen langer Telegraphendraht), so ist ein Galvanometer mit kurzer, aus nur wenigen Drahtwindungen bestehender Rolle unbrauchbar, und man muss ein Galvanometer mit einer Rolle anwenden, wo viele Drahtwindungen um die Nadel geführt sind. Den Grund hiefür findet man später (Art. 352). Hieraus ergibt sich, dass verschieden konstruierte Instrumente nötig sind, je nach der Art der Untersuchung; bei allen ist jedoch erforderlich, dass sie eine quantitative Messung zulassen und dass sie für den zu messenden Strom hinreichend empfindlich sind.

198. Nobili's astatisches Galvanometer. Der von Nobili konstruierte Apparat besteht aus einem astatischen Nadelpaar, welches sehr empfindlich aufgehängt ist, und zwar so, dass die untere Nadel zwischen einer Drahtrolle schwebt, welche auf einen Rahmen von Elfenbein gewunden ist (Fig. 88). Dieser Apparat war lange Zeit eine beliebte Form eines empfindlichen Galvanometers. Da die Nadeln desselben vom Erdmagnetismus unabhängig sind, so stellen sie sich entsprechend der Torsion des dünnen Drahtes, an welchem sie aufgehängt sind. Den

---

Büchern »Rheotrop«. Doch sind diese Ausdrücke jetzt nicht mehr gebräuchlich.

Digitized by Google

Rahmen, über welchen die Rolle gewunden ist, muss man ganz genau parallel zu den Nadeln aufstellen. Drei Schraubenfüsse dienen dazu, die Grundfläche des Instruments horizontal zu stellen. Ein gläsernes Gehäuse schützt gegen Luftströmungen. Wird ein Strom durch die Drahtrollen geschickt, so bewegen sich die Nadeln zur Rechten oder Linken über einem graduierten Kreise. Sind die Ablenkungen *gering* (d. h. weniger als 10 bis 15 Grad), so sind dieselben fast genau der Stärke der sie erzeugenden Ströme proportional. Bewirkt z. B. ein Strom eine Ablenkung von 6°, so ist derselbe annähernd 3mal so stark wie ein Strom, welcher die Nadel bloss um 2° ablenkt. Dieses näherungsweise giltige Verhältnis verliert jedoch seine Richtigkeit, wenn die Ablenkung mehr als 15 bis 20° beträgt. Denn in diesem Falle wirkt der Strom auf die Nadel nicht mehr so vorteilhaft, da ihre Pole sich dann nicht mehr innerhalb der Rollen befinden, sondern an der Seite über dieselben hinausragen, und da überdies die Nadel zu der auf sie wirkenden Kraft schief steht, so wird erstere nur noch von einem Teile der Kraft abgelenkt, entgegen der richtenden Kraft des Aufhängedrahtes; der andere Teil der Kraft bewegt die Nadel der Länge nach, was hier nicht in Betracht kommt. Man kann jedoch das Galvanometer »*kalibrieren*«, d. h. man kann durch besondere Messungen oder durch Vergleichung mit einem Normalapparat feststellen, welche Stromstärke einer gewissen Ablenkung entspricht. Nimmt man z. B. als schon bekannt an, dass eine Ablenkung von 32° an einem besondern Galvanometer durch einen Strom von $\frac{1}{100}$ Ampère erzeugt wird, dann erzeugt ein Strom von jener Stärke an jenem Apparate *stets* dieselbe Ablenkung, vorausgesetzt, dass die Torsionskraft oder die

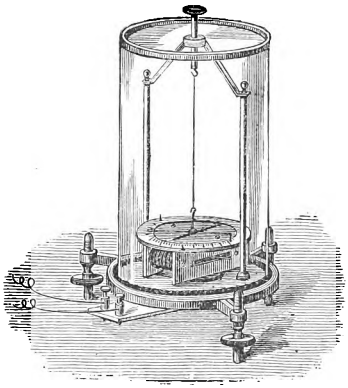

Fig. 88.

Digitized by Google

Intensität des magnetischen Feldes sich nicht zufällig geändert haben.

199. **Die Tangentenbussole.** Aus den oben angeführten Gründen ist es unmöglich, ein Galvanometer zu konstruieren, bei welchem der (in Graden gemessene) *Winkel*, um welchen die Nadel abgelenkt wird, für alle Grössen der Stromstärke proportional ist. Möglich dagegen ist es, ein sehr einfaches Galvanometer zu konstruieren, bei welchem die *Tangente*[1]) des Ablenkungswinkels der Stromstärke genau proportional ist. Fig. 89 zeigt eine häufige Form der **Tangentenbussole**. Die Rolle

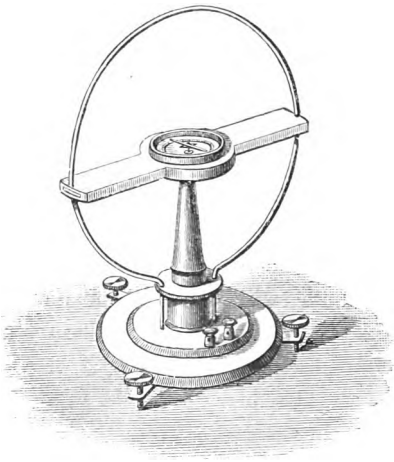

Fig. 89.

dieses Apparates besteht aus einem einfachen Kreise von dickem Kupferdrahte, dessen Durchmesser 25 bis 40 cm beträgt. Im Mittelpunkte wird eine magnetisierte, nicht mehr als 2—3 cm lange Stahlnadel leicht beweglich aufgehängt, welche gewöhnlich noch mit einem leichten Zeiger aus Aluminium versehen ist. Der Apparat wird eingestellt, indem man die Ebene des Drahtkreises in den magnetischen Meridian stellt, so dass also

1) Vergl. die Anmerkung über Winkelmessung, Seite 115.

Digitized by Google

die kleine Nadel sich in der Ebene der Rolle befindet. Wesentlich bei diesem Apparate ist der Umstand, dass die Nadel im Verhältnis zum Radius der Rolle sehr klein ist. Das »Feld«, welches ein durch den Kreis fliessender Strom erzeugt, ist im Mittelpunkte und in der Nachbarschaft desselben sehr gleichmässig, und die Kraftlinien sind dort wirklich senkrecht zur Ebene der Rolle [1]). Dies gilt aber nicht von andern Stellen innerhalb des Kreises, da die Kraft weder gleichmässig, noch senkrecht wirkt, ausgenommen *in der Ebene* der Rolle und *in ihrem Mittelpunkte.* Bei der geringen Grösse der Nadel sind ihre Pole nie weit vom Mittelpunkte entfernt, und gelangen daher niemals an Stellen, wo die magnetische Kraft unregelmässig ist. Jede magnetische Kraft, welche der Strom in der Rolle auf die Nadel ausübt, wirkt senkrecht zur Ebene des Kreises und deshalb rechtwinklig zum magnetischen Meridian. Nun wurde in Art. 124 bewiesen, dass die magnetische Kraft, welche rechtwinklig zum Meridian wirkt und an einer Magnetnadel die Ablenkung δ erzeugt, gleich der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus an jenem Orte ist, multipliziert mit der *Tangente* des Ablenkungswinkels. Daher lenkt ein in der Rolle fliessender Strom die Nadel um einen Winkel ab, *dessen Tangente der Stromstärke proportional ist.*

Beispiel. Angenommen, eine Batterie erzeugte an einem Tangenten-Galvanometer eine Ablenkung von 15^0, und eine zweite stärkere Batterie eine Ablenkung von 30^0. Die Stromstärken verhalten sich dann nicht wie 15 zu 30, sondern wie tang 15^0 zu tang 30^0. Diese Werte hat man einer trigonometri-

1) Um die Gleichmässigkeit des Feldes mit Sicherheit zu erhalten, schlug Gaugain vor, die Nadel in einem Punkte der Achse der Rolle aufzuhängen, dessen Entfernung vom Mittelpunkte gleich dem halben Radius der Rolle wäre. Die Anordnung von v. Helmholtz, bestehend in 2 parallelen Rollen, die symmetrisch auf beiden Seiten der Nadel sind, ist besser; und ein Galvanometer aus 3 Rollen, von denen die mittlere grösser, als die beiden andern ist, so dass alle drei etwa in der Oberfläche einer Kugel liegen, in deren Zentrum sich die kleine Nadel befindet, ist der geeignetste Apparat zur Erzielung eines gleichmässigen Feldes im Mittelpunkte.

Digitized by Google

schen Tafel, wie z. B. der auf Seite 118 gegebenen zu entnehmen, und man findet alsdann, dass das Verhältnis der Stromstärken wie 0,268 zu 0,577 ist, oder annähernd wie 10 zu 12. Oder allgemeiner: Wenn der Strom C die Ablenkung δ erzeugt, und der Strom C' die Ablenkung δ', so ist:

$$C : C' = \text{tang } \delta : \text{tang } \delta'.$$

Um das Nachschlagen in einer Tabelle zu ersparen, werden auf der Kreisskala des Apparates bisweilen die Tangentenwerte statt der Bogengrade verzeichnet. Man ziehe eine Tangente OT an den Kreis (Fig. 90) und trage auf dieser Linie von O aus

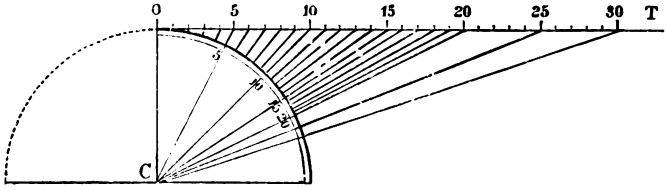

Fig. 90.

mehrere gleiche Teile ab und verbinde die Teilpunkte mit dem Mittelpunkte. Auf diese Weise wird der Kreis in eine Anzahl Sektoren zerlegt, von denen die dem Punkte O zunächst liegenden fast gleich sind, welche jedoch immer kleiner werden, je mehr man sich von O entfernt. Diese ungleichen Sektoren entsprechen gleichen Zunahmen der Tangente. Wäre die Skala auf diese Weise angefertigt, so wären die Ablesungen den Tangenten proportional. Es ist jedoch schwieriger, einen Bogen mit Genauigkeit in Tangentenlinien, als in gleiche Grade zu teilen; deshalb wendet man diese allerdings bequeme Einteilung nicht an, wenn es sich um grosse Genauigkeit handelt.

200. Absolute Strommessung mit der Tangentenbussole. Mit Hilfe der Tangentenbussole lässt sich die Stärke eines Stromes in »absoluten« Einheiten angeben, wenn die »Konstanten« des Apparates bekannt sind. Die Tangente des Ablenkungswinkels gibt (vergl. Art. 124) das Verhältnis der vom Strome herrührenden magnetischen Kraft zur horizontalen Kom-

Digitized by Google

ponente des Erdmagnetismus an. Beide Kräfte wirken auf die Nadel und sind in *gleicher* Weise von dem magnetischen Moment der Nadel abhängig, welches wir deshalb in diesem Falle nicht zu kennen brauchen. Wir wissen, dass die vom Strome im Mittelpunkte der Rolle ausgeübte Kraft dem Produkte aus der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus und der Tangente des Ablenkungswinkels proportional ist. Diese beiden Grössen erhält man aus den Tafeln, und aus ihnen berechnen wir den absoluten Wert des Stromes wie folgt: Es möge r den (in Zentimetern gemessenen) Radius der Galvanometer-Rolle bedeuten; die gesamte Länge derselben ist dann $2r\pi$ (wenn sie bloss aus einer Windung besteht). Der Abstand aller Teile der Rolle vom Mittelpunkte ist natürlich $= r$. Aus unserer Definition für die Einheit der Stromstärke (Art. 196) folgt, dass die (in Krafteinheiten gemessene) Kraft im Mittelpunkte gleich

$$i \times \frac{2\pi r}{r^2} \text{ oder}$$

$$i \times \frac{2\pi}{r} = \text{H} \,.\, \text{tang}\ \delta$$

folglich:

$$i = \frac{r}{2\pi} \,.\, \text{H} \,.\, \text{tang}\ \delta.$$

Die Grösse $\frac{r}{2\pi}$ heisst der »Reduktionsfaktor« des Galvanometers.

Folglich erhalten wir den Wert des Stromes in absoluten (elektromagnetischen) Einheiten[1]), wenn wir die Galvanometerkonstante, die horizontale Komponente des Erdmagnetismus des Ortes und die Tangente des Ablenkungswinkels mit einander multiplizieren. Häufig werden Tangentengalvanometer mit mehreren Windungen konstruiert. In diesem Falle ist der »Reduktionsfaktor« $= \frac{r}{2\pi n}$, wenn n die Anzahl der Windungen bedeutet.

---

1) Aus den Artikeln 196 und 323 geht hervor, dass die praktische Einheit des Stromes, welche wir »ein Ampère« nennen, nur den zehnten Teil einer »absoluten« Einheit im Zentimeter-Gramm-Sekunden-System beträgt.

Digitized by Google

200a. **Ampèrometer.** Ayrton und Perry haben kürzlich zur Messung der starken bei der elektrischen Beleuchtung benutzten Ströme Galvanometer konstruiert, bei welchen ein an der Magnetnadel befestigter Zeiger die Stromstärke direkt in »*Ampères*« angibt (Art. 323). Bei diesen Instrumenten, die leicht transportabel sind und in welchen die Bewegung der Magnetnadel »aperiodisch« ist, befindet sich die Nadel zwischen den Polen eines kräftigen, permanenten Magnets, durch welchen ihre Richtung bestimmt wird, so dass sie unabhängig vom Erdmagnetismus ist. In Folge einer besondern Form der Polenden der festen Magnete, der Nadel und der Rollen sind die Winkelablenkungen der Stärke des ablenkenden Stromes proportional. Die Rollen sind in 10 einzelnen Abteilungen gewickelt, welche je nach Belieben entweder »hinter einander« oder »neben einander« geschaltet werden können, indem man einen passend eingerichteten Kommutator umlegt, so dass auf diese Weise die Ablesungen auf der Skala durch Anwendung eines gewöhnlichen Elements verifiziert werden können. Zu diesen Ampèrometern werden kurze Rollen von sehr geringem Widerstande und wenigen Drahtwindungen benutzt. Ayrton und Perry haben auch Voltmeter (vergl. Art. 360 d) mit langen Rollen von grossem Widerstande auf ähnliche Weise construiert.

201. Die Sinus-Bussole. Der Nachteil der soeben beschriebenen Tangentenbussole besteht in ihrer geringen Empfindlichkeit, da die Rolle im Vergleich zur Nadel notwendigerweise sehr gross ist und sich deshalb in grösserer Entfernung von derselben befindet. Ein Galvanometer mit einer kleinern Rolle oder einer grössern Nadel würde man als Tangentengalvanometer nicht gebrauchen können, obgleich seine Empfindlichkeit eine grössere sein würde. *Jedes* empfindliche Galvanometer, bei welchem die Nadel durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, lässt sich jedoch als **Sinusbussole** gebrauchen, vorausgesetzt, dass der Rahmen, auf welchen die Drahtwindungen gewickelt sind, sich um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse drehen lässt. Ist der Apparat in dieser Weise konstruiert, so wendet man folgende Methode der Strommessung an: die Rolle wird zunächst der Nadel (d. h. also dem magnetischen Meridiane) parallel gestellt; alsdann schickt man einen Strom hindurch, welcher eine Ablenkung erzeugt; die Rolle selbst wird nun in demselben Sinne gedreht, bis dieselbe mit der Nadel wieder parallel steht. In dieser Lage wirken zwei Kräfte auf

Digitized by Google

die Nadel, nämlich die richtende Kraft des Erdmagnetismus, welche in der Richtung des magnetischen Meridians wirkt, und dann diejenige Kraft, welche der durch die Rolle fliessende Strom ausübt, und welche die Pole der Nadel um einen rechten Winkel zu drehen strebt. In der That hat man hier ein Kräftepaar, welches genau dem Kräftepaar des Erdmagnetismus das Gleichgewicht hält. In der Vorlesung über die magnetischen Kraftgesetze (Art. 123) ergab sich nun, dass, wenn eine Nadel abgelenkt wird, das Moment des Kräftepaares dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional ist. Wird deshalb bei der Sinusbussole die Rolle so weit gedreht, dass die Nadel ihr wieder parallel ist, so ist *die Stromstärke in der Rolle dem Sinus des Winkels proportional, um welchen die Rolle gedreht wurde* [1]).

202. Das Spiegel-Galvanometer. Ist ein Galvanometer von grosser Empfindlichkeit erforderlich, so müssen die beweglichen Teile sehr leicht und klein sein. Um die Bewegungen einer sehr kleinen Nadel zu übersehen, muss man einen *Zeiger* irgend welcher Art benutzen. In der That ist es beim Tangentengalvanometer üblich, an der kurzen, starken Nadel einen feinen, unbiegsamen Zeiger aus Aluminium zu befestigen. Eine weit bessere Methode besteht darin, an der Nadel einen sehr leichten Spiegel von mit Silber belegtem Glase anzubringen, mit Hilfe dessen ein Lichtstrahl nach einer Skala reflektiert werden kann, so dass die geringste Bewegung der Nadel vergrössert

---

1) Wer die Stärke zweier Ströme vergleichen will, hat hier wieder eine Tafel der natürlichen Sinus nötig, wie sie auf Seite 118 angegeben sind. Nehmen wir an, dass beim Strome C die Rolle um einen Winkel von Θ^0 gedreht werden muss, und bei einem zweiten Strome C′ um Θ'^0, so ist:

$$C : C' = \sin \Theta : \sin \Theta'.$$

Es wird natürlich vorausgesetzt, dass der Apparat mit einer Skala versehen ist, auf welcher man den Winkel, um welchen die Rolle gedreht wurde, in Graden ablesen kann. Man kann hier auch in Fällen, wo es sich um blosse Näherungswerte handelt, den Kreis statt in Bogengrade in Teile teilen, welche gleichen Zunahmen des Sinus entsprechen. Man thut gut daran, diese Methode der Kreisteilung zu versuchen, nachdem man vorher die Anmerkung über Methoden der Winkelberechnung, Seite 115, gelesen hat.

Digitized by Google

sichtbar gemacht wird. Die *Spiegelgalvanometer*, welche W. Thomson zum Zwecke des Signalisierens durch unterseeische Kabel erfand, sind beachtenswerte Beispiele dieser Art Apparate. Fig. 91 zeigt die allgemeine Einrichtung dieses Apparates. Der

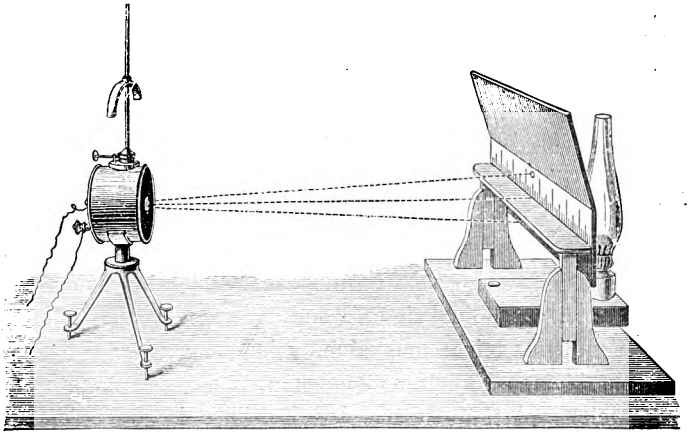

Fig. 91.

Hauptbestandteil des Galvanometers ruht auf drei Schraubenfüssen, durch welche derselbe senkrecht gestellt werden kann. Der Magnet besteht aus einer oder mehreren kleinen Stückchen einer Uhrfeder aus Stahl, welche auf der Rückseite eines leichten konkaven Glasspiegels von der ungefähren Grösse eines 10-Pfennig-Stücks befestigt sind. Dieser Spiegel hängt an einem einfachen Seidenkokonfaden innerhalb der Rolle, und ein gekrümmter Magnet, welcher dem Erdmagnetismus entgegenwirken oder die Nadel richten soll, wird an einer vertikalen Stütze oberhalb der Rolle befestigt. Dem Galvanometer gegenüber befindet sich die Skala. Ein Lichtstrahl von einer Petroleum-Lampe geht durch eine enge Oeffnung unter der Skala und fällt auf den Spiegel, welcher ihn nach der Skala zurückwirft. Der Spiegel ist schwach konkav und liefert einen scharf begrenzten Lichtfleck, wenn die Skala um die Brennweite des

Digitized by Google

Spiegels von diesem entfernt ist [1]). Der *richtende* Magnet setzt den Experimentierenden in den Stand, den reflektierten Lichtfleck auf den Nullpunkt der Skala fallen zu lassen. Der schwächste durch das Galvanometer fliessende Strom hat zur Folge, dass der Lichtfleck nach links oder rechts verschoben wird. Der schwache Strom, welcher erzeugt wird, wenn man die Spitze einer Messingnadel und eine Stahlnadel (die durch Drähte mit den Enden des Galvanometers verbunden sind) in einen Tropfen Salzwasser taucht, verschiebt den Lichtfleck sogleich über die Skala. Bei Anwendung eines starken Kalklichtes lässt sich die Bewegung der Nadel 1000 Personen zu gleicher Zeit sichtbar machen. Für noch empfindlichere Arbeiten kann man ein astatisches Nadelpaar anwenden, bei welchem jede Nadel von einer besondern Rolle umgeben, und der Spiegel an einer der Nadeln befestig ist.

Starke Ströme darf man nicht durch sehr empfindliche Galvanometer schicken, denn wenn sie auch nicht verdorben werden, so sind doch die Ablenkungen der Nadel zu gross, um noch eine genaue Messung zu ermöglichen. In solchen Fällen bringt man an dem Galvanometer noch einen *Nebenschluss* (Shunt) an, einen Widerstand, welcher so gestellt ist, dass der grössere Teil des Stromes durch ihn an dem Galvanometer vorbeifliesst, so dass dann nur ein kleiner Teil des Stromes wirklich durch die Rolle des Apparates hindurchfliesst. Der Widerstand des Nebenschlusses muss in einem bekannten Verhältnis zum Widerstande des Apparates stehen, gemäss dem in Art. 353 über Stromverzweigungen angegebenen Prinzipe.

---

1) Da konkave Spiegel teuer sind, so ersetzt man dieselben durch ebene Spiegel, und bringt vor ihnen eine Linse von passender Brennweite an. Die dünnen Glasscheiben, welche beim Mikroskop als Deckgläschen dienen, bilden vorzügliche leichte Spiegel, wenn dieselben mit Silber belegt werden. Wo eine grosse Genauigkeit gewünscht wird, wird ein feiner Draht in der vom Lichtstrahle zu passierenden Oeffnung angebracht, dann erscheint das Bild desselben auf dem Schirme als dunkle, den Lichtfleck durchziehende Linie.

Digitized by Google

203. Das Differential-Galvanometer. Zum Zwecke der Vergleichung zweier Ströme wird häufig ein Galvanometer angewendet, bei welchem die Rolle aus *zwei* getrennten Drähten besteht, welche neben einander aufgewickelt sind. Werden zwei gleiche Ströme in entgegengesetzten Richtungen durch diese Drähte gesandt, so bewegt sich die Nadel nicht. Sind die Ströme jedoch ungleich, so wird die Nadel durch den stärkern Strom abgelenkt, und zwar mit einer Kraft, welche der *Differenz* der Stärke beider Ströme entspricht.

204. Das ballistische Galvanometer. Um die Stärke von solchen Strömen zu messen, welche nur sehr kurze Zeit dauern, wendet man Galvanometer an, bei denen die Nadel eine verhältnismässig grosse Schwingungsdauer hat. Dies ist der Fall bei langen oder schweren Nadeln; auch kann man die Nadeln mit Bleigewichten beschweren. Da die Nadel langsam schwingt, so addieren sich gleichsam die verschiedenen Impulse, welche der kurz dauernde Strom in den einzelnen Momenten ausübt. *Der Sinus des halben Winkels des ersten Ausschlages der Nadel ist der durch die Rolle geflossenen Elektrizitätsmenge proportional.* Auf diese Weise lässt sich die Ladung eines Kondensators messen, indem man denselben durch ein ballistisches Galvanometer entladet.

XVIII. VORLESUNG: *Chemische Wirkungen des Stromes. — Voltameter.*

205. Ausser den chemischen Wirkungen innerhalb der Elemente einer Batterie, welche stets die Stromerzeugung begleiten, gibt es noch chemische Wirkungen, welche ausserhalb der Batterie vor sich gehen, wenn der Strom durch gewisse Flüssigkeiten geschickt wird. Die Flüssigkeiten lassen sich in 3 Klassen einteilen: 1) *diejenigen, welche überhaupt nicht leiten,* wie z. B. Terpentin und viele Oele, besonders Petroleum; 2) *diejenigen, welche leiten, ohne dabei zersetzt zu werden,* wie Quecksilber und andere geschmolzene Metalle, welche ebenso leiten, wie feste

Digitized by Google

Metalle; 3) *diejenigen, welche zersetzt werden, wenn sie einen Strom leiten,* nämlich die verdünnten Säuren, Lösungen von metallischen Salzen, und gewisse geschmolzene Verbindungen fester Körper.

206. Zersetzung des Wassers. Im Jahre 1800 machten Carlisle und Nicholson die Entdeckung, dass sich der Volta'sche Strom durch Wasser leiten lässt und dass derselbe bei seinem Durchgange einen Teil der Flüssigkeit in ihre gasförmigen Bestandteile zerlegt. Diese Gase erschienen als Blasen an den Enden der Drähte, welche den Strom in die Flüssigkeit und aus derselben heraus leiteten; und zwar erschienen *Sauerstoffgas*blasen an der Stelle, wo der Strom in die Flüssigkeit eintrat, und *Wasserstoffgas*blasen dort, wo derselbe die Flüssigkeit verliess. Es stellte sich alsbald heraus, dass eine grosse Zahl anderer Flüssigkeiten, besonders verdünnte Säuren und Lösungen metallischer Salze, auf ähnliche Weise zersetzt werden konnten, wenn man einen Strom durch dieselben sandte.

207. Elektrolyse. Diesem Zersetzungsprozesse einer Flüssigkeit mit Hilfe eines elektrischen Stromes gab Faraday den Namen **Elektrolyse** (d. h. elektrische Analyse); und diejenigen Körper, welche auf diese Weise zersetzt oder elektroanalysiert werden können, nannte er **Elektrolyte.**

Die Drahtenden, welche nach und von der Batterie führen, heissen **Elektroden**; zur Unterscheidung nennt man das Ende, durch welches der Strom eintritt, die **Anode**, und das, an welchem er austritt, die **Kathode.** Das Gefäss, in welchem sich eine zu zersetzende Flüssigkeit befindet, heisst eine *elektrolytische Zelle.*

208. Die Elektrolyse des Wassers. Um auf die Zersetzung des Wassers zurückzukommen, so können wir zunächst bemerken, dass vollkommen reines Wasser nicht zu leiten scheint, doch wird sein Widerstand durch Beimischung einiger Tropfen Schwefelsäure oder Salzsäure sehr verkleinert. Der in Fig. 92 veranschaulichte Apparat ist für diesen Zweck geeignet. Die Pole einer Batterie von 2 Elementen (die in der Figur sind Bunsen'sche) stehen mit 2 aus Streifen von Platinblech bestehen-

Digitized by Google

den Elektroden in Verbindung, welche in ein mit angesäuertem Wasser gefülltes Gefäss führen. Zwei an ihrem einen Ende

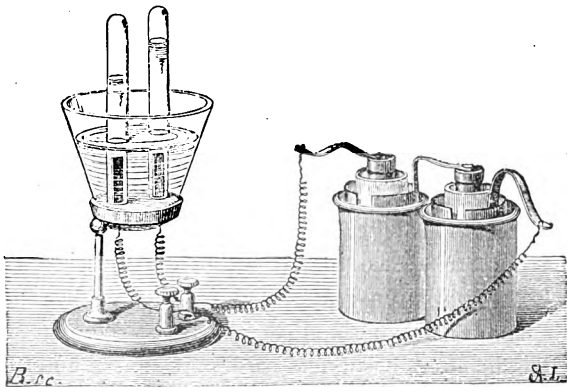

Fig. 92.

geschlossene Röhren, welche vorher mit Wasser angefüllt und dann umgekehrt wurden, nehmen die an den Elektroden entwickelten Gase auf. Platin ist andern Metallen, wie Kupfer oder Eisen, als Elektrode vorzuziehen, da es weniger leicht oxydiert und jeder Säure widersteht. Man findet, dass sich an der Kathode fast genau zweimal so viel Wasserstoffgas (dem Volumen nach) bildet, als Sauerstoff an der Anode. Diese Thatsache stimmt mit der bekannten chemischen Zusammensetzung des Wassers überein, welches durch Verbindung dieser beiden Gase im Verhältnis von zwei Volumenteilen des erstern mit einem des letztern entsteht. Die Volumina der entwickelten Gase verhalten sich jedoch nicht genau wie 2 zu 1, denn einmal wird ein kleiner Teil des Wasserstoffes von der Oberfläche des Platins absorbiert oder »okkludiert«, während ein beträchtlicherer Teil des Sauerstoffes — ungefähr 1 Prozent — in der dichteren allotropischen Form des *Ozons* ausgeschieden wird, welches weniger Raum einnimmt und im Wasser auch etwas löslich ist. Ist eine hinreichende Menge der Gase entwickelt und angesammelt, so können dieselben untersucht werden; der

Digitized by Google

Wasserstoff dadurch, dass man seine Brennbarkeit zeigt, der Sauerstoff dadurch, dass man durch denselben einen glimmenden Holzspan zur Flamme entfacht. Werden beide Gase in einer und derselben Röhre aufgefangen, so ergibt sich, dass das Gasgemisch die wohlbekannte Explosiv-Eigenschaft des Knallgases hat. Die chemische Zersetzung wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$H_2O = H_2 + O$$

Wasser gibt 2 Vol. Wasserstoff und 1 Vol. Sauerstoff.

209. Elektrolyse des schwefelsauren Kupferoxyds. Als zweites Beispiel wollen wir die Elektrolyse einer Lösung des bekannten blauen Vitriols oder des schwefelsauren Kupferoxyds betrachten. Werden einige Krystalle dieses Körpers im Wasser aufgelöst, so erhält man eine blaue Flüssigkeit, welche durch den Strom eines einzigen Elements einer gewöhnlichen Batterie zwischen 2 Elektroden von Platinblech ohne Schwierigkeit elektroanalysiert werden kann. Die chemische Formel für schwefelsaures Kupferoxyd ist $CuSO_4$. Das Resultat der Elektrolyse ist die Zersetzung desselben in metallisches Kupfer, welches die Kathode als feine Schicht überzieht, und in das Radikal der Schwefelsäure, ein leicht zersetzbares Gemisch aus Schwefel und Sauerstoff, auf welches sofort das Wasser reagiert und mit ihm Schwefelsäure und Sauerstoff bildet. Dieser Sauerstoff wird in Gestalt von Blasen an der Anode frei. Die chemischen Veränderungen lassen sich folgendermassen ausdrücken:

$$CuSO_4 = Cu + SO_4$$

Schwefelsaures Kupferoxyd — Kupfer und Schwefelsäureradikal

$$SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$$

Schwefelsäureradikal und Wasser — Schwefelsäure und Sauerstoff.

Auf diese Weise wird, solange der Strom fliesst, der Flüssigkeit beständig Kupfer entzogen und an der Kathode abgesetzt und die Flüssigkeit wird immer mehr zu Säure. Beim Gebrauche kupferner Elektroden statt solcher von Platin, wird kein Sauerstoff an der Anode ausgeschieden, dagegen löst sich die Kupferanode selbst in der Flüssigkeit auf, und zwar in genau dem-

Digitized by Google

selben Verhältnis, in welchem das Kupfer der Flüssigkeit an der Kathode abgesetzt wird.

210. Anion und Kathion. Die Atome, welche auf diese Weise von einander geschieden und von dem Strome unmerkbar nach den Elektroden geführt und dort abgesetzt werden, sind offenbar zweierlei Art: die einen gehen zur Anode, die andern zu der Kathode. Faraday nannte die wandernden Atome **Jonen**, und unterschied zwischen **Anion**, welches zur Anode, und **Kathion**, welches zur Kathode geht. Das Anion betrachtet man bisweilen als »elektronegativ«, weil es sich so bewegt, als ob es vom + Pol der Batterie angezogen würde, während das Kathion dann als »elektropositiv« angesehen wird. Wasserstoff und die Metalle sind Kathionen, da sie sich scheinbar *mit* dem Strome bewegen, und da abgesetzt werden, wo derselbe die elektrolytische Zelle verlässt. Zu den Anionen gehören Sauerstoff, Chlor etc. Wenn z. B. Chlorzink elektrolysiert wird, so wird das metallische Zink an der Kathode abgesetzt, während sich an der Anode Chlorgas entwickelt.

211. Quantitative Gesetze der Elektrolyse.

1) *Die Grösse der chemischen Wirkung ist in allen Punkten eines Schliessungsbogens gleich gross.* Werden zwei oder mehr elektrolytische Becher an verschiedenen Punkten eines Schliessungsbogens angebracht, so ist die Grösse der chemischen Wirkung überall dieselbe, denn dieselbe Elektrizitätsmenge fliesst in derselben Zeit durch jeden Punkt des Schliessungsbogens. Enthalten alle diese Becher angesäuertes Wasser, so wird z. B. in jedem dieselbe Menge Wasserstoff frei, oder enthalten sie eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd, so werden in allen gleiche Quantitäten Kupfer abgesetzt. Enthalten einige der Becher angesäuertes Wasser, andere schwefelsaures Kupferoxyd, so sind die Gewichte des Wasserstoffs und des Kupfers nicht *gleich,* verhalten sich jedoch wie ihre chemischen *Aequivalente.*

2) *Die Menge eines Jon, welche an einer Elektrode in einer bestimmten Zeit ausgeschieden wird, ist der Stromstärke proportional.* Ein Strom von 2 *Ampères* erzeugt genau eine doppelt so grosse

Digitized by Google

chemische Zersetzung, wie in gleicher Zeit ein Strom von 1 *Ampère.*

3) *Die Menge eines Jon, welches in einer Sekunde an einer Elektrode ausgeschieden wird, ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit dem »elektrochemischen Aequivalente« des Jon.* Durch den Versuch hat man gefunden, dass der Durchgang eines *Coulomb* Elektrizität durch Wasser 0,000010352 g Wasserstoff frei macht[1]). Folglich macht ein Strom, dessen Stärke = C (Ampère), pro Sekunde C × 0,000010352 g Wasserstoff frei. Die Grösse 0,000010352 heisst das *elektro-chemische Aequivalent* des Wasserstoffs. Die »elektro-chemischen Aequivalente« anderer Elemente lassen sich leicht berechnen, wenn ihr chemisches »Aequivalent« bekannt ist. So ist z. B. das chemische Aequivalent[2]) des Kupfers = 31,5; multipliziert man dies mit 0,000010352, so ergibt sich für das elektro-chemische Aequivalent des Kupfers der Wert 0,0003261 g.

---

1) Nach Lord Rayleigh 0,000010352 g; nach F. und W. Kohlrausch 0,000010354 g.

2) Das chemische »Aequivalent« ist nicht mit dem »Atomgewichte« zu verwechseln. Das Atomgewicht des Kupfers ist 63, d. h. seine Atome sind 63 mal so schwer, als die Atome des Wasserstoffs. Aber in chemischen Verbindungen ersetzt ein Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff, oder ist »gleichwertig« mit ihnen; folglich beträgt das Gewicht des Kupfers, welches einem Atom Wasserstoff »äquivalent« ist, $\frac{63}{2} = 31\frac{1}{2}$. In allen Fällen ist das chemische »Aequivalent« gleich dem Quotienten $\frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}}$. Die Tabelle des Art. 212 gibt hierüber hinreichend Aufklärung.

Digitized by Google

212. Tabelle der elektro-chemischen Aequivalente etc.

	Atomgewicht.	Wertigkeit.	Chemisches Aequivalent.	Elektrochemisches Aequivalent (Gramm pro Coulomb).
Elektropositive Körper:				
Wasserstoff	1	1	1	0,000010352
Kalium	39,1	1	39,1	0,0004047
Natrium	23	1	23	0,0002381
Gold	196,6	3	65,5	0,0006780
Silber	108	1	108	0,0011180
Kupfer	63	2	31,5	0,0003261
Quecksilber	200	2	100	0,0010351
Zinn	118	2	59	0,0006108
Eisen	56	2	28	0,0002898
Nickel	59	2	29,5	0,0003054
Zink	65	2	32,5	0,0003364
Blei	207	2	103,5	0,0010684
Elektronegative Körper:				
Sauerstoff	16	2	8	0,0000828
Chlor	35,5	1	35,5	0,0003675
Jod	127	1	127	0,0013147
Brom	80	1	80	0,0008282
Stickstoff	14	3	4,3	0,0001445

213. Die folgende Gleichung drückt die Regel aus, nach welcher man das Gewicht eines gegebenen Jon findet, welches aus einer elektrolytischen Lösung während einer bekannten Zeit durch einen Strom von bekannter Stärke ausgeschieden wird. Bedeutet C die (nach Ampère gerechnete) Stromstärke, t die Zeit (in Sekunden), z das elektrochemische Aequivalent und w das (in Grammen ausgedrückte) Gewicht des frei gewordenen Elements, so ist

$$w = z \,.\, C \,.\, t$$

Digitized by Google

oder in Worten: *Das Gewicht eines durch Elektrolyse ausgeschiedenen Elements wird gefunden, wenn man sein elektrochemisches Aequivalent mit der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fliesst, multipliziert.*

Beispiel. Ein Strom von 5 Daniell'schen Elementen geht 10 Minuten lang durch 2 elektrolytische Becher, von welchen der eine eine Silberlösung, der andere angesäuertes Wasser enthält. Eine Tangentenbussole im Schliessungsbogen weist auf eine Stromstärke von 5 Ampères. Das Gewicht des ausgeschiedenen Silbers ist dann $0{,}001118 \times 5 \times 10 \times 60 = 0{,}3354$ g, und das Gewicht des im zweiten Becher entwickelten Wasserstoffes $0{,}000010352 \times 5 \times 10 \times 60 = 0{,}0031056$ g.

214. Voltameter. Das zweite der obigen Gesetze, wonach die Grösse der in einer bestimmten Zeit frei gewordenen Jone der Stromstärke proportional ist, wird nach seinem Entdecker bisweilen als das *Faraday'sche Gesetz* bezeichnet. Faraday wies nach, dass dasselbe ein Mittel gewährt, die Stärke von Strömen auf chemischem Wege zu messen. Einen elektrolytischen Becher, welcher so eingerichtet war, dass man die Stromstärke durch die Grösse der vom Strome hervorgebrachten chemischen Wirkung messen konnte, nannte er ein **Voltameter.**

215. Wasser-Voltameter. Der in Fig. 92 veranschaulichte Apparat kann passend ein Wasser-Voltameter genannt werden, vorausgesetzt, dass die zur Ansammlung der Gase dienenden Röhren geteilt sind, so dass die entwickelten Mengen gemessen werden können. Das Gewicht jedes gemessenen Kubikzentimeters Wasserstoff (bei einer Normaltemperatur von 0° C und einem Drucke von 760 mm) beträgt bekanntlich 0,0000896 g. Hat man also die Anzahl der Kubikzentimeter gefunden, welche in einer gegebenen Zeit durch einen Strom von unbekannter Stärke entwickelt werden, so kann man die Stromstärke berechnen, indem man zunächst das Volumen auf Gewicht reduziert und dann durch das Produkt aus der Zeit und dem elektrochemischen Aequivalente dividiert. Jedes *Coulomb* Elektrizität macht bei seinem Durchgange 0,1157 cbcm Wasserstoff und 0,0579 cbcm Sauerstoff frei. Werden diese Gase zusammen in einem *Mischungsgas-Voltameter* aufgefangen, so erhält man für

Digitized by Google

jedes durchgehende *Coulomb* Elektrizität 0,1736 cbcm von dem entwickelten Gasgemenge. Um 9 g Wasser zu zersetzen, d. h. um 1 g Wasserstoff und 8 g Sauerstoff frei zu machen, sind 96,600 *Coulombs* erforderlich.

216. Kupfer- und Silbervoltameter. Wenn schwefelsaures Kupferoxyd zwischen 2 Kupferelektroden elektrolysiert wird, so löst sich, wie oben erwähnt wurde, die Anode langsam auf, während sich an der Kathode eine Schicht von einer gleichen Quantität Kupfer ansammelt. Ein Coulomb Elektrizität setzt 0,0003261 g ab; und um ein Gramm abzusetzen, müssen im Ganzen 3066 Coulombs durch die Elektroden fliessen. Ein Strom von einem Ampère setzt in jeder Stunde 1,174 g Kupfer oder 4,025 g Silber ab.

Wenn man eine der Elektroden vor und nach dem Durchgange des Stromes wiegt, so findet man, dass die Zunahme (oder Abnahme) der hindurchgeflossenen Elektrizitätsmenge proportional ist. Im Jahre 1879 schlug Edison, der bekannte Erfinder, vor, diese Methode zu benutzen, um die Elektrizitätsmenge zu messen, welche einem Hause mit elektrischer Beleuchtung zugeführt sei; indem ein kleines Kupfervoltameter, welches in dem das Haus versehenden Schliessungsbogen einzuschalten sei, als Elektrizitätsmesser dienen sollte. Verschiedene andere Arten von Coulombmetern sind in Vorschlag gebracht worden, mit Uhrwerkzählern, welche integrierende Scheiben umdrehen, oder mit andern mechanischen Vorrichtungen, welche die gesamte vom Strome zugeführte Elektrizitätsmenge summieren.

217. Vergleich der Voltameter und Galvanometer. Sowohl das *Galvanometer*, wie das *Voltameter* haben den Zweck, die Stromstärke zu messen, das eine auf magnetischem, das andere auf chemischem Wege. Faraday wies nach, dass die magnetischen und chemischen Wirkungen eines Stromes einander proportional sind. Das Galvanometer lässt jedoch durch die Stellung der Nadel die Stromstärke in jedem Augenblick erkennen, und zeigt die Aenderungen der Stromstärke von Moment zu Moment. Beim Voltameter kann ein veränderlicher Strom die Gasblasen oder die Kupferatome in diesem Augenblicke schnell, und im nächsten langsam frei machen, aber alle die verschiedenen Mengen werden einfach zu einer totalen Summe vereinigt. In der That gibt uns das Voltameter »das Zeitintegral« des Stromes. Das Voltameter gibt uns nicht sowohl an, wie *stark der Strom* in einem beliebigen Augenblicke

Digitized by Google

war, sondern vielmehr, *welche Elektrizitätsmenge* im ganzen während des Versuchs durch dasselbe geflossen ist.

218. Chemischer Nachweis für schwache Ströme. Ein sehr schwacher Strom genügt, um in gewissen Körpern eine wahrnehmbare chemische Aenderung hervorzubringen. Werden ein paar Krystalle Jodkalium, eines weissen Salzes, in Wasser aufgelöst und darauf etwas Stärke hinzugefügt, so erhält man einen sehr empfindlichen Elektrolyt, welcher an der Anode eine indigoblaue Farbe annimmt, sobald ein sehr schwacher Strom hindurchgeht. Durch die Zersetzung des Salzes wird an der Anode Jod frei, welches auf die Stärke wirkt und mit ihr eine gefärbte Mischung bildet. Taucht man weisses Löschpapier in die präparierte Flüssigkeit, legt dasselbe dann auf die Kathode und berührt es mit der Anode, so kann man auf diese Weise sehr bequem die vom Strome herrührende Färbung prüfen. Eine Lösung von Ferrocyankalium (gelbes Blutlaugensalz) liefert bei der Elektrolyse das bekannte Berliner Blau. Bain machte den Vorschlag, dies bei einem chemischen Schreibtelegraphen zu verwerten, indem die kurzen und langen Ströme, welche von einer Batterie durch die Leitung gesandt würden, auf diese Weise mit blauer Farbe auf einen Streifen präparierten Papiers aufgezeichnet werden könnten, welcher durch ein Uhrwerk am Ende des positiven Drahtes entlang gezogen würde. Faraday zeigte, dass die chemische Färbung eines mit Stärke und Jodkalium angefeuchteten Papierstreifens beim Durchgange jeder Art von Elektrizität hervorgebracht wurde — sei es Reibungselektrizität oder galvanische oder Thermo- oder Magnetelektrizität — selbst durch die Elektrizität des Zitteraals. In der That führte er diese chemische Probe als einen Beweis der Identität der verschiedenen Arten der Elektrizität an.

219. Innere und äussere Wirkungen. In einer der vorhergehenden Vorlesungen wurde nachgewiesen, dass die Grösse der chemischen Wirkung innerhalb der Elemente der Batterie der Stromstärke proportional ist. Daher findet das erste Gesetz des Art. 211 sowohl auf den innerhalb der Batterie

Digitized by Google

befindlichen Teil des Schliessungsbogens Anwendung, als auf den ausserhalb der Batterie befindlichen Teil.

Angenommen, 3 Daniell'sche Elemente werden zur Zersetzung des Wassers in einem Voltameter gebraucht. Während dann 1 Gramm Wasserstoff (11,200 cbcm) und 8 Gramm Sauerstoff (5,600 cbcm) in dem Voltameter frei werden, werden in jedem Elemente der Batterie 31,5 Gramm Kupfer abgesetzt und (wenn man den durch lokale Wirkung erzeugten Verlust nicht in Anrechnung bringt) 32,5 Gramm Zink in jedem Elemente aufgelöst.

220. Hieraus geht mit Evidenz hervor, dass die elektrolytische Zelle die Umkehr des Volta'schen Elements ist. Die in dem Volta'schen Elemente verrichtete chemische Arbeit liefert die Energie des Stromes, welchen jenes Element in dem Schliessungsbogen erregt. In der elektrolytischen Zelle wird chemische Arbeit verrichtet, indem die erforderliche Energie von dem elektrischen Strome geliefert wird, welchen eine selbstständige Batterie oder eine andere Quelle in den Becher entsendet.

Eine Theorie der Elektrolyse und einige Beispiele ihrer Anwendung finden sich in der 38. Vorlesung über Elektrochemie.

XIX. VORLESUNG: *Physikalische und physiologische Wirkungen des Stromes.*

221. **Molekularwirkungen.** Werden metallische Leiter einer fortgesetzten Einwirkung von Strömen unterworfen, so vollziehen sich in ihnen langsame molekulare Veränderungen. Drähte von Kupfer oder Messing werden unter der Einwirkung von Strömen spröde. Während des Durchganges des Stromes durch metallische Drähte nimmt ihre Kohäsion zeitweilig ab; auch scheint eine Abnahme ihres Elastizitätskoeffizienten statt zu finden. Edlund glaubte an gespannten Drähten eine bestimmte Ausdehnung wahrzunehmen, wenn ein Strom durch sie gesandt wurde; doch ist bis jetzt noch nicht zur Genüge nach-

Digitized by Google

gewiesen, dass diese Ausdehnung unabhängig von derjenigen Ausdehnung ist, welche eine Folge der Erhitzung des Drahtes ist, die von dem dem Strome gebotenen Widerstande herrührt.

222. Elektrische Osmose. Wird ein starker Strom in gewisse Flüssigkeiten geleitet, um dieselben zu elektrolysieren, und trennt man die Elektroden durch eine poröse Scheidewand, so führt der Strom auf mechanische Weise einen Teil der Flüssigkeit durch die poröse Scheidewand, so dass die Flüssigkeit auf der einen Seite höher steht, als auf der andern. Diese als *elektrische Osmose* bekannte Thatsache ist bei schlecht leitenden Flüssigkeiten, wie Alkohol und Schwefelkohlenstoff, sehr augenscheinlich. Der Durchgang durch die Scheidewand findet in der Richtung des Stromes statt; d. h. die Flüssigkeit steht an der Kathode höher, als an der Anode.

223. Elektrische Destillation. Im engen Zusammenhange mit der vorigen Erscheinung steht die *elektrische Destillation* von Flüssigkeiten. Beccaria beobachtete, dass eine elektrisierte Flüssigkeit schneller verdunstet, als eine unelektrische. Gernez hat neuerdings gezeigt, dass in einer gebogenen, geschlossenen Röhre, welche zwei Teile einer Flüssigkeit enthält, von denen der eine stark +, der andere stark — elektrisch ist, die Flüssigkeit von der + nach der — Seite übergeht. Diese scheinbare Destillation ist nicht eine Folge des Temperaturunterschiedes, noch hängt sie von der Grösse der beeinflussten Oberfläche ab, sondern die Flüssigkeit breitet sich allmählich längs der innern Oberfläche der Glasröhren aus. Schlechte Leiter, wie z. B. Terpentin, verbreiten sich nicht in dieser Weise.

224. Diaphragmen-Ströme. Professor Quincke machte die Entdeckung, dass in einer Flüssigkeit ein Strom entsteht, wenn dieselbe durch ein poröses Diaphragma gepresst wird. Diese Erscheinung lässt sich als die Umkehrung der elektrischen Osmose auffassen. Die E.M.K. des Stromes richtet sich nach dem Drucke und nach der Natur des Diaphragmas. Wurde Wasser bei einem Drucke von einer Atmosphäre durch Schwefel

Digitized by Google

gepresst, so betrug die Potentialdifferenz mehr als 9 Volt. Bei einem Diaphragma von Porzellan oder tierischer Blase betrug die Differenz nur 0,35, resp. 0,01 Volt.

225. Elektro-Kapillarerscheinungen. Wenn man eine horizontale, an den Enden nach oben umgebogene Glasröhre mit verdünnter Säure füllt, und in die Mitte der Röhre einen Tropfen Quecksilber bringt, so bewegt sich derselbe, falls ein Strom durch die Röhre geschickt wird, nach dem negativen Pole. Man nimmt an, dass an der Trennungsfläche des Quecksilbers und der Säure in Folge der Elektrolyse sehr geringe Gasmengen frei werden, und die Oberflächenspannung sich hierdurch bedeutend ändert, so dass in Folge der Kapillarkräfte eine Bewegung erfolgt. Lippmann, Dewar und Andere haben nach diesem Prinzipe *Kapillar-Elektrometer* konstruiert, bei denen durch den Druck einer Flüssigkeitssäule der Elektro-Kapillarkraft, welche an der Trennungsfläche des Quecksilbers und der verdünnten Säure ausgeübt wird, das Gleichgewicht gehalten wird. Die Elektro-Kapillarkraft ist annähernd der elektromotorischen Kraft proportional, falls diese ein Volt nicht übersteigt. Fig. 93 zeigt das Kapillar-Elektrometer von Dewar. Eine Glas-

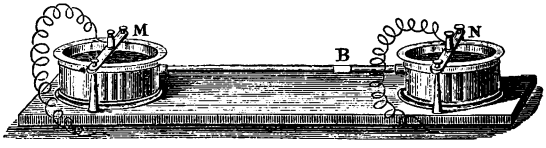

Fig. 93.

röhre liegt horizontal zwischen zwei gläsernen Gefässen, in welche dieselbe mit ihren Enden einmündet. Die Röhre wird mit Quecksilber gefüllt, welches einen Tropfen verdünnter Säure einschliesst. Als Elektroden dienen Platindrähte, welche in das Quecksilber der Gefässe tauchen. Eine E.M.K. von nur $\frac{1}{300}$ Volt genügt, um eine messbare Verschiebung des Tropfens hervorzubringen.

226. Physiologische Wirkungen. Wenn Elektrizität durch den menschlichen Körper geleitet wird, so bringt sie in

Digitized by Google

den Nerven gewisse schmerzhafte Empfindungen hervor, und bewirkt ein unfreiwilliges Zusammenziehen der Muskeln. Die plötzliche Entladung selbst einer geringen Elektrizitätsmenge auf einer bis zu einem hohen Potential geladenen Leydener Flasche oder einer Induktionsrolle (s. Fig. 148) veranlasst im Körper eine durchdringende, schmerzhafte *Erschütterung*. Der Strom einiger starken Grove'schen Elemente, welchen man durch den eigenen Körper leitet, indem man die Leitungsenden mit nassen Händen anfasst, verursacht eine ganz andere, unangenehme, stechende Empfindung in Arm- und Schultergelenken, ohne jedoch krampfhafte Kontraktionen zur Folge zu haben, ausgenommen bei nervösen oder schwachen Personen, beim Oeffnen oder Schliessen des Stromes. Dieser Unterschied hat darin seinen Grund, dass die Gewebe des Körpers einen sehr beträchtlichen Widerstand bieten, und dass die Potentialdifferenz im ersten Falle viele tausend Volt betragen kann; folglich kann die in der Leydener Flasche angehäufte Menge, obgleich sie in Wirklichkeit sehr gering ist, doch durch ihre grosse E.M.K. den Widerstand auf einmal überwinden. Obgleich die Batterie in dem Falle, wo sie durch einen guten Leiter hindurchwirkt, in einer Sekunde tausendmal mehr Elektrizität liefert, so kann dieselbe in Folge ihrer begrenzten E.M.K. doch nur einen kleinen Bruchteil durch den Körper hindurchschicken, da derselbe einen grossen Widerstand bietet.

Nachdem Cunäus im Jahre 1745 den elektrischen *Schlag* der Leydener Flasche entdeckt hatte, wurden noch viele andere Versuche angestellt. Ludwig XV von Frankreich liess 700 Karthäuser Mönchen, welche sich die Hände gegeben hatten, einen Schlag von einer Batterie Leydener Flaschen erteilen, und erzielte dabei einen wunderbaren Erfolg. Franklin tötete einen Truthahn durch einen Schlag von einer Leydener Flasche.

227. Im Jahre 1752 machte Sulzer die folgende Beobachtung: »Wenn man 2 Stücke Blei und Silber verbindet, und dieselben dann auf die Zunge legt, so empfindet man einen

Digitized by Google

gewissen *Geschmack*, welcher dem des grünen Vitriols gleicht, während jedes Stück einzeln keine derartige Empfindung hervorbringt.« Diesen **galvanischen Geschmack**, von welchem man damals noch nicht vermutete, dass er mit der Elektrizität in irgend welchem Zusammenhange stände, kann man hervorrufen, wenn man eine Silbermünze auf die Zunge legt und eine Stahlfeder darunter hält, so dass eine metallische Berührung zwischen beiden stattfindet. Denselben Geschmack nimmt man wahr, wenn man die beiden Polenden eines Volta'schen Elements mit der Zunge in Berührung bringt.

228. Ritter machte die Entdeckung, dass ein schwacher durch den Augapfel gesandter Strom dort dieselbe Empfindung hervorruft, wie ein greller *Lichtblitz*, welcher den Sehnerv plötzlich reizt. Ein stärkerer Strom, welcher mittelst feuchter, an den Batterieenden befestigter Leiter hindurchgeschickt wurde, erzeugte, so lange er zwischen Stirn und Hand floss, eine blaue und grüne *Lichtempfindung*. Helmholtz bemerkte bei der Wiederholung dieses Versuchs bloss eine seltsame Farbenempfindung. Dr. Hunter sah Lichtblitze, als er ein Stück Metall unter seine Zunge hielt und dasselbe mit einem zweiten berührte, welches die feuchten Gewebe des Auges berührte. Volta und Ritter hörten musikalische Töne, als sie einen Strom durch ihre Ohren leiteten; und Humboldt fand, dass in den Geruchsorganen eine Empfindung hervorgebracht wurde, wenn ein Strom zwischen der Nasenöffnung und dem Kehldeckel fliesst. Jeder der erwähnten Sinne kann durch den Strom zur Thätigkeit gereizt werden. Der Mensch besitzt keinen besondern Sinn für die Wahrnehmung elektrischer Kräfte, wie er solche für Licht und Schall besitzt; doch liegt kein Grund vor, weshalb man es für unmöglich halten sollte, dass einige der niedern Tiere mit einem besondern elektrischen Sinne begabt wären.

Der folgende Versuch zeigt die Wirkung schwacher Ströme auf kaltblütige Tiere. Legt man eine Kupfer- oder Silbermünze auf eine Zinkplatte, und lässt eine gewöhnliche Gartenschnecke über letztere kriechen, so zieht dieselbe ihre Fühlhörner ein

Digitized by Google

und rollt ihren Körper zusammen, sobald sie mit dem Kupfer in Berührung kommt. Lässt man sie über zwei Kupferdrähte kriechen, welche man hierauf mit einem schwachen Volta'schen Elemente verbindet, so kündigt sie augenblicklich durch eine ähnliche Zusammenziehung das Entstehen eines Stromes an [1]).

229. **Muskelzusammenziehung.** Im Jahre 1678 zeigte Swammerdam dem Grossherzog von Toskana folgenden Versuch: Wenn man einen Muskel eines Froschschenkels, welcher an einem mit Silberdraht umwickelten Nervenfaden aufgehängt ist, über eine kupferne Stütze hält, so dass sowohl der Nerv, als auch der Draht das Kupfer berühren, so zieht sich der Muskel sofort zusammen. Mehr als ein Jahrhundert später wurde Galvani auf dieselbe Thatsache aufmerksam, indem er die Beobachtung machte, dass die Schenkel von frisch getöteten Fröschen unter dem Einflusse des »Rückschlages« jedesmal, wenn eine in der Nähe befindliche Elektrisiermaschine entladen wurde, sich krampfhaft zusammenzogen. Unbekannt mit Swammerdam's Versuch, machte er im Jahre 1786 die Entdeckung (auf welche bereits in Art. 148 hingewiesen wurde, da sie schliesslich zur Entdeckung der Volta'schen Säule führte), dass, wenn Nerven und Muskeln mit zwei verschiedenen, sich einander berührenden Metallen in Berührung kommen, eine Zusammenziehung des Muskels stattfindet. Die nach Galvani präparierten Froschschenkel zeigt Fig. 94. Nachdem das Tier getötet ist, werden die Hinterschenkel abgelöst und abgehäutet; die Schenkelnerven und ihre Verbindungen mit den Lendenrückenwirbeln bleiben sitzen. Die Schenkel bewahren ihre zusammenziehende Kraft noch einige Stunden nach dem Tode. Die auf diese Weise präparierten Froschschenkel bilden ein ungemein empfindliches Galvanoskop: an ihnen lassen sich z. B. die sehr schwachen Induktionsströme des Telephons (Vorl. 40) nachweisen,

1) Es ist kaum glaublich, dass ein gewisser Jules Alix einst allen Ernstes ein Telegraphensystem in Vorschlag brachte, welches auf dieser physiologischen Erscheinung basierte.

Digitized by Google

obschon die meisten empfindlichen Galvanometer dieselben nur unvollkommen anzeigen. Galvani und Aldini wiesen nach, dass

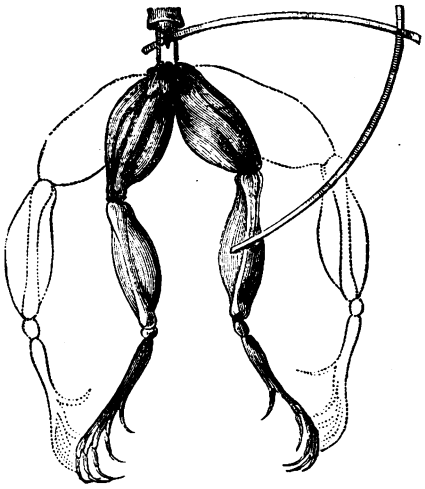

Fig. 94.

andere Tiere gleiche Wirkungen erleiden. Mit einer aus 100 Plattenpaaren bestehenden Säule experimentierte Aldini an frisch getöteten Schafen, Ochsen und Kaninchen, und fand, dass bei ihnen krampfhafte Muskelzusammenziehungen stattfinden. Humboldt wies dasselbe bei Fischen nach; und Zanotti, welcher durch einen frisch getöteten Grashüpfer einen Strom schickte, veranlasste ersteren zu seinem gewöhnlichen Zirpen. Aldini, und später Dr. Ure aus Glasgow experimentierten an den Körpern hingerichteter Verbrecher, mit schrecklich anzusehendem Erfolge. Die Gesichtsmuskeln erlitten grässliche Verzerrungen und die Brust hob sich mit der Zusammenziehung des Zwerchfelles. Dieser Umstand führte zur Anwendung elektrischer Ströme bei Wiederbelebungsversuchen von Ertrunkenen, da die Zusammenziehung der Brustmuskeln dazu dient, die Athmungsorgane wieder in Thätigkeit zu versetzen. Die kleinen Muskeln,

Digitized by Google

welche an den Wurzeln der Kopfhaare sitzen, scheinen vorzugsweise für elektrische Zustände empfindlich zu sein, da sich die Haare beim Elektrisieren sofort sträuben.

230. Bedingungen der Muskelzusammenziehung. Um eine Muskelzusammenziehung hervorzurufen, muss der Strom einen Teil des Nervs der Länge nach durchfliessen. In einem frisch präparierten Frosche verursacht der Strom nur momentan eine Zusammenziehung, wenn der Schliessungsbogen geöffnet oder geschlossen wird. Ein schnell unterbrochener Strom veranlasst eine zweite Zusammenziehung, bevor die erste vorüber ist, und der Muskel zeigt auf diese Weise eine fortwährende, dem *Starrkrampfe* gleichende Zusammenziehung. Nach kurzer Zeit verliert der präparierte Frosch einen Teil seiner Empfindlichkeit, und ein direkter Strom (d. h. ein solcher, welcher den Nerv in der Richtung vom Gehirne zum Muskel durchströmt) bringt nur dann eine Wirkung hervor, wenn der Schliessungsbogen geschlossen wird, während ein »umgekehrter« Strom nur dann eine Wirkung hervorbringt, wenn der Schliessungsbogen geöffnet wird. Matteucci, welcher diese Beobachtungen machte, entdeckte auch durch Versuche an lebenden Tieren, dass die Sinnes- und die Bewegungsnerven sich in Bezug auf Leitungsfähigkeit unterscheiden, — ein »direkter« Strom affiziert die Bewegungsnerven, wenn der Schliessungsbogen geschlossen, und die Sinnesnerven, wenn derselbe geöffnet wird, während ein »umgekehrter« Strom den umgekehrten Erfolg hat. Bis jetzt weiss man jedoch noch wenig von den Bedingungen der Leitungsfähigkeit der Nervensubstanz; Nerven leiten besser als Muskelgewebe, Knorpel oder Knochen; das Blut ist jedoch der beste Leiter von allen Bestandteilen des Körpers. Kräftige Ströme elektrolysieren das Blut ohne Zweifel bis zu einem gewissen Grade, indem sie dasselbe und die darin enthaltenen Eiweissstoffe gerinnen machen. Die *zusammenziehende* Kraft, welche von der Einwirkung des Stromes herrührt, scheint eine spezifische Eigenschaft des *Protoplasmas* zu sein, überall, wo dasselbe auftritt. Die Amöben, die niedrigsten, einfachsten Or-

Digitized by Google

ganismen, erleiden Zusammenziehungen. Ritter machte die Entdeckung, dass die *Sinnpflanze* sich beim Elektrisieren öffnet und Burdon Sanderson hat gezeigt, dass diese Eigenschaft sich auch auf andere Pflanzen erstreckt, dass dieselbe sich bei den *fleischfressenden Pflanzen* findet, z. B. bei der Venusfliegenfalle (Dionaea).

231. Animalische Elektrizität. Obschon Galvani zugab, wenigstens in seinen spätern Schriften, dass die solche Wirkungen hervorbringende Elektrizität von den verwendeten Metallen herrühre, bestand er doch auf dem Vorhandensein einer *animalischen Elektrizität*, welche in den Muskel- und Nervengeweben ihren Sitz hätte. Er zeigte, dass sich ohne jede Anwendung von Metallen Zusammenziehungen schon dadurch hervorrufen liessen, dass man einen Nerv an zwei verschiedenen Punkten längs seiner Oberfläche mit einem von einem lebenden Frosch abgeschnittenen Muskelstück berührte; und dass ein metallischer Konduktor, welcher einen Nerv mit einem Muskel verbindet, gleichfalls genügte, um in dem Muskel eine Zusammenziehung hervorzurufen. Galvani und Aldini hielten diese Thatsachen für Widerlegungen der Volta'schen Kontakt-Theorie. Volta betrachtete sie als einen Beweis dafür, dass die Berührung zwischen Nerv und Muskel selbst (wie in dem Falle zweier verschiedenen Metalle) entgegengesetzte elektrische Zustände erzeugte. Später zeigte Nobili, dass, wenn der Nerv und der Muskel des Frosches durch Wasser mit den Enden eines empfindlichen Galvanometers in Verbindung gesetzt werden, ein mehrere Stunden dauernder *Strom* erzeugt wird; er stellte sogar eine Reihe von Froschschenkeln zusammen, wie die Elemente einer Batterie, und verstärkte auf diese Weise den Strom. Matteucci zeigte, dass durch den Muskel allein eine elektromotorische Kraft entsteht. Du Bois Reymond hat gezeigt, dass, wenn das Ende eines Muskels quer durchschnitten wird, die Enden der Muskelfasern des Querschnitts negativ und die Seitenflächen derselben positiv sind, und dass diese Potentialdifferenz auch dann einen Strom erzeugt, wenn der Muskel in Ruhe ist. Um

Digitized by Google

dies nachzuweisen, benutzte er ein empfindliches, astatisches Galvanometer mit 20,000 Drahtwindungen; und um Fehler zu vermeiden, welche durch die Berührung der Drahtenden mit den Geweben entstehen könnten, gebrauchte er *unpolarisierbare Elektroden,* welche er sich auf die Weise herstellte, dass er die Enden der Zinkspitzen in eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd tauchte. Diese Lösung war in einer feinen Glasröhre enthalten, welche am Ende durch einen porösen Stöpsel von angefeuchtetem Kaolin verschlossen war. Durch die Muskelzusammenziehung werden ebenfalls Ströme erzeugt. Solche erhielt Du Bois Reymond durch seine eigenen Muskeln, indem er die Spitzen seiner Zeigefinger in zwei Schalen mit Salzwasser tauchte, die mit den Enden des Galvanometers in Verbindung standen. Ein plötzliches Zusammenziehen der Muskeln eines Armes erzeugte einen Strom in der Richtung von den zusammengezogenen zu den nicht zusammengezogenen Muskeln. Wie Dewar gezeigt hat, entsteht ein elektrischer Strom im Sehnerv, wenn das Licht auf die Netzhaut des Auges fällt.

232. **Medizinische Anwendungen.** Elektrische Ströme hat man mit Erfolg bei der Wiederbelebung von Personen angewendet, die vom Ertrinken gerettet wurden, da die Zusammenziehung des Zwerchfelles und der Brustmuskeln dazu dient, das Atmen zu beschleunigen. Seit der Entdeckung der Leydener Flasche hat man mannigfache Versuche gemacht, um eine elektrische ärztliche Behandlung zu begründen. Diskontinuierliche Ströme, besonders solche, welche von kleinen Induktionsrollen und magneto-elektrischen Maschinen herrühren, benutzen praktrische Aerzte, um die Nerven bei Lähmungen und andern Krankheiten anzuregen. Doch sollte man elektrische Ströme nur mit grosser Vorsicht anwenden, und stets unter der Leitung von regelrecht ausgebildeten Aerzten [1]).

---

1) Es ist nicht überflüssig, in dieser Beziehung ernstlich vor den zahlreichen Quacksalbern zu warnen, welche das unkundige Publikum mit mag-

Digitized by Google

netischen und galvanischen »Heilmitteln« täuschen. In vielen Fällen haben diese überall öffentlich bekannt gemachten Betrügereien unberechenbares Unheil angestiftet, und in den sehr wenigen Fällen, wo angeblich ein guter Erfolg zu verzeichnen war, war das Heilmittel wahrscheinlich nicht Magnetismus, sondern Wolle!

Digitized by Google

ZWEITER TEIL.

KAPITEL IV.

ELEKTROSTATIK.

XX. VORLESUNG: *Potentialtheorie.*

233. Die Vorlesungen des ersten Kapitels hatten den Zweck, den Leser mit einigen Fundamentalbegriffen über das Vorhandensein und Messen bestimmter Elektrizitätsmengen bekannt zu machen. Diese Vorlesung, welche für den Anfänger eine der schwierigsten und wichtigsten ist, und die er deshalb um so sorgfältiger zu studieren hat, enthält eine ausführlichere Erklärung derjenigen Gesetze, welche von der Grösse der Elektrizitätsmengen und ihrer Messung handeln. Die Richtigkeit des Satzes: Wissenschaft ist Messen, zeigt sich in keinem Wissenszweige deutlicher, als in der Elektrizitätslehre. Derjenige Teil derselben, welcher von dem Messen elektrischer Ladungen handelt, heisst **Elektrostatik.** Wir beginnen mit der Erklärung der einfachen elektrischen Kraftgesetze, welche im ersten Kapitel mittelst einfacher Experimente beleuchtet wurden.

234. Erstes Gesetz der Elektrostatik. *Gleichnamige elektrische Ladungen stossen sich ab, ungleichnamige elektrische Ladungen ziehen sich an.* Die in diesem Gesetze angegebenen fundamentalen Thatsachen wurden in der ersten Vorlesung zur Genüge erklärt. Obgleich diese Thatsachen dem Leser geläufig und scheinbar einfach sind, so erfordern sie doch zu ihrer

Digitized by Google

vollständigen Erklärung die Zuhilfenahme der höheren mathematischen Analysis. Sie sollen hier als einfache Thatsachen der Beobachtung behandelt werden.

235. **Zweites Gesetz der Elektrostatik.** *Die Kraft, welche 2 elektrische Ladungen auf einander ausüben* (man nehme an, dass sie an zwei Punkten oder auf 2 kleinen Kugeln angesammelt sind) *ist ihrem Produkte direkt, dem Quadrate ihres Abstandes umgekehrt proportional.* Dieses von Coulomb entdeckte und nach ihm benannte Gesetz wurde bereits kurz auf Seite 18 erwähnt, als die Versuche mit der Torsionswaage beschrieben wurden; und es wurden dort auch Beispiele zur Beleuchtung beider Teile des Gesetzes angeführt. Wir sahen auch, dass ein analoges Gesetz für die Kräfte galt, welche zwei Magnetpole auf einander ausübten. Coulomb wendete auch die Methode der Schwingungen an, um die Angaben der Torsionswaage zu verifizieren und erhielt eine völlige Bestätigung der Resultate. Wir können die beiden Teile des Coulomb'schen Gesetzes auf folgende Weise symbolisch ausdrücken. Bezeichnen f die Kraft, q und q' die Elektrizitätsmengen der beiden Ladungen und d den Abstand zwischen ihnen, so ist:

1) f proportional zu $q \times q'$

und

2) f proportional zu $\frac{1}{d^2}$.

Diese beiden Ausdrücke lassen sich zu einem vereinigen; und es ist sehr zweckmässig, unsere Maasseinheiten so zu wählen, dass wir, statt der symbolischen Ausdrücke, die Gleichung schreiben können:

$$f = \frac{q \times q'}{d^2}.$$

236. **Einheit der elektrischen Masse.** Wollen wir aber das Vorstehende als eine Gleichheit schreiben, so ist klar, dass wir unsere elektrische Einheit in Uebereinstimmung mit den bereits feststehenden Einheiten zur Messung der Kraft und des Abstandes wählen müssen. Alle Elektriker sind jetzt thatsächlich übereingekommen, ein System anzunehmen, welches

Digitized by Google

auf 3 fundamentalen Einheiten basiert, nämlich auf dem **Zentimeter** als *Längeneinheit*, auf dem **Gramm** als *Masseneinheit* und auf der **Sekunde** als *Zeiteinheit*. Alle andern Einheiten lassen sich aus diesen ableiten, wie in der Anmerkung am Schluss dieser Vorlesung auseinandergesetzt wird. Unter den abgeleiteten Einheiten dieses Systems ist besonders die *Krafteinheit* zu merken, welche **Dyn** genannt wird, d. h. diejenige Kraft, welche, wenn sie eine Sekunde lang auf eine Masse von einem Gramm wirkt, ihr eine Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde erteilt. Nehmen wir also das Dyn als Krafteinheit und das Zentimeter als Längeneinheit (oder Abstandseinheit), so müssen wir eine elektrische Masseneinheit finden, welche mit denselben in unserer Gleichung übereinstimmt. Es ist ganz klar, dass, wenn jede der Grössen q, q' und d gleich 1 gesetzt würde (d. h. wenn wir jede der beiden Ladungen vom Werte 1 nähmen und sie einen Zentimeter von einander entfernten) der Wert des Ausdruckes $\frac{q \times q'}{d^2} = \frac{1 \times 1}{1 \times 1} = 1$ sein würde. Daher stellen wir folgende **Definition** der *Einheit der Elektrizität* auf, welche wir am Ende der zweiten Vorlesung schon kurz anführten: *Eine Einheit der Elektrizität ist diejenige Menge, welche in einer Entfernung von einem Zentimeter von einer gleichen Menge derselben Art dieselbe mit einer Krafteinheit abstösst.*

Ein Beispiel wird es dem Leser erleichtern, die Anwendung des Coulomb'schen Gesetzes zu verstehen.

Beispiel. Zwei kleine Kugeln, welche mit 6 resp. 8 Einheiten positiver Elektrizität geladen sind, befinden sich in einem Abstande von 4 Zentimetern von einander. Es soll die Kraft gefunden werden, welche sie auf einander ausüben. Nach der Formel $f = \frac{q \times q'}{d^2}$ finden wir $f = \frac{6 \times 8}{4^2} = \frac{48}{16} = 3$ Dyn. Weitere Beispiele findet der Leser in den Uebungsaufgaben am Ende des Buches.

Im obigen Falle würde die Kraft natürlich eine abstossende sein. Wäre eine dieser Ladungen negativ gewesen, so würde

Digitized by Google

das Produkt $q \times q'$ einen negativen Wert gehabt haben, und das Resultat würde — 3 Dyn gewesen sein. Das Vorkommen des negativen Zeichens vor einer Kraft zeigt daher an, dass es eine *anziehende* Kraft ist, während das positive Zeichen eine *abstossende* Kraft bedeuten würde.

237. Potential. Zunächst haben wir den Ausdruck *Potential* in seiner Anwendung auf elektrische Kräfte zu definieren; um die Bedeutung jedoch klar verständlich zu machen, muss eine kleine Erklärung vorausgeschickt werden. Angenommen wir hätten eine Ladung positiver Elektrizität auf einer kleinen isolierten Kugel A (Fig. 95), welche sich in sehr grosser Ent-

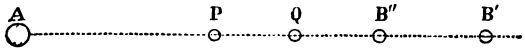

Fig. 95

fernung von allen andern elektrischen Ladungen und elektrischen Konduktoren befindet. Würden wir ihr einen zweiten Körper B nähern, der ebenfalls mit + Elektrizität geladen wäre, so würde A den Körper B abstossen. Doch würde die abstossende Kraft von der *Masse* der neuen Ladung und von ihrer *Entfernung* von A abhängen. Nehmen wir an, dass die neue Ladung, welche A genähert wird, eine Einheit positiver Elektrizität beträgt; wäre B sehr weit davon entfernt, so würde die abstossende Kraft sehr gering sein, und es bedürfte einer sehr geringen Arbeit, den Körper B in einer Richtung zu bewegen, welche der Richtung der von A ausgeübten abstossenden Kräfte entgegengesetzt ist; je näher aber B dem A rückt, desto grösser wird die abstossende Kraft, und um so mehr Arbeit würde erforderlich sein, um B den abstossenden Kräften entgegen dem A zu nähern. Angenommen, wir hätten in unendlich grosser Entfernung von A begonnen, und dann unsere kleine Versuchsladung B von B′ nach B″ vorgeschoben, hierauf nach Q und so endlich bis zum Punkte P, den von A ausgeübten abstossenden Kräften entgegen, so würden wir einen gewissen Aufwand von *Arbeit* zu machen gehabt haben; diese

Digitized by Google

Arbeit stellt das *Potential*[1]) von A im Punkte P dar. Denn folgendes ist die *Definition* des **elektrostatischen Potentials**: *Das Potential in irgend einem Punkte ist die Arbeit, welche aufgewendet werden muss, um eine Einheit positiver Elektrizität aus unendlicher Entfernung bis zu jenem Punkte zu bewegen.* Wäre die Ladung auf A negativ gewesen, so würde die Kraft eine anziehende gewesen sein, in welchem Falle wir theoretisch das Potential im Punkte P zu messen hätten, entweder durch den umgekehrten Prozess, indem wir dort eine + Einheit aufstellten, und dieselbe dann den anziehenden Kräften entgegen bis in unendliche Entfernung bewegten, oder auch indem wir die Grösse der Arbeit berechneten, welche von einer + Einheit verrichtet würde, während dieselbe aus unendlicher Entfernung bis zum Punkte P angezogen wird.

Hat man mehrere elektrische Körper zu berücksichtigen, so lässt sich zeigen, dass ihr Potential für einen bestimmten Punkt gleich der Summe der Potentiale (für jenen Punkt) jedes einzelnen Körpers ist.

238. Es lässt sich auch nachweisen, dass das Potential im Punkte P in der Nähe eines elektrischen Körpers A gleich der auf A befindlichen Elektrizität ist, dividiert durch den Abstand von A und P. Oder nennen wir die Menge q und den Abstand r, so ist das Potential $\frac{q}{r}$[2]). Sind mehrere elektrische

1) Im weitesten Sinne hat man unter Potential so viel wie »Fähigkeit, Arbeit zu verrichten« zu verstehen. Denn wenn wir eine gewisse Menge Arbeit zu verrichten haben, um eine elektrische Einheit aus unendlicher Entfernung gegen die abstossenden Kräfte einer Ladung zu bewegen, so hat die Ladung die Kraft, ebensoviel Arbeit zu verrichten, denn sie verbraucht eine genau ebenso grosse Menge Arbeit, um die elektrische Einheit in unendliche Entfernung zurück zu treiben. Wenn wir ein Kilogramm der Schwerkraft entgegen 5 Meter hoch heben, so vermag das Gewicht des Kilogrammes umgekehrt eine Arbeit von 5 Kilogrammmetern zu verrichten, indem dasselbe auf die Erde zurückfällt. Man vergleiche den Abschnitt über Energie in den Lehrbüchern über elementare Physik.

2) Der vollständige Beweis würde eine elementare Anwendung der In-

Digitized by Google

Körper in verschiedenen Abständen von P vorhanden, so kann man die einzelnen Werte des Potentials $\frac{q}{r}$ jedes einzelnen elektrischen Körpers besonders bestimmen, und daher kann man *das Potential im Punkte P bestimmen, indem man die Menge jeder Ladung durch ihren Abstand vom Punkte P dividiert, und dann die so erhaltenen Werte addiert.* Zur Bezeichnung des Potentials dient gewöhnlich der Buchstabe V. Das Potential im Punkte P wollen wir V_p nennen; dann ist:

$$V_p = \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \frac{q'''}{r'''} + \cdots\cdots$$

oder $V_p = \Sigma \frac{q}{r}$.

Dieser Ausdruck $\Sigma \frac{q}{r}$ stellt die Arbeit dar, welche an oder von einer Einheit positiver Elektrizität verrichtet wird, wenn dieselbe aus unendlicher Entfernung bis zum Punkte P bewegt wird, je nachdem das Potential in P positiv oder negativ ist.

Beweis. Zuerst bestimme man die Potentialdifferenz zwischen den Punkten P und Q, welche von einer elektrischen Ladung q auf einer kleinen Kugel A herrührt. Man bezeichne den Abstand AP mit r und AQ mit r';

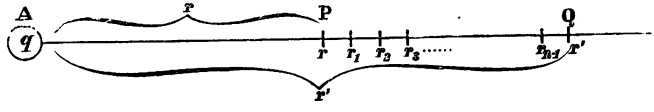

Fig. 96.

dann ist $PQ = r' - r$. Die Potentialdifferenz zwischen P und Q ist die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man der Kraft entgegen eine + Einheit von Q nach P bewegt, und da Arbeit = Kraft × Weg, durch welchen sie geleistet, so ist

$$V_p - V_q = f(r' - r).$$

Die Kraft, welche q im Punkte P auf eine + Einheit ausübt, ist $\frac{q}{r^2}$; und

---

tegralrechnung erfordern; doch findet sich weiter unten eine leichte geometrische Beweisführung, welche für vorliegenden Zweck ausreicht.

Digitized by Google

ebenso die Kraft, welche q im Punkte Q auf eine + Einheit ausübt, $\frac{q}{r'^2}$. Angenommen der Abstand PQ sei in eine bestimmte Anzahl (etwa n) gleicher Teile geteilt, rr_1; r_1r_2; r_2r_3; . . . . $r_{n-1}r'$. Die Kraft in r ist $= \frac{q}{r^2}$; in $r_1 = \frac{q}{r_1{}^2}$ . . . etc.

Da man nun r_1 so nahe als man will an r rücken lassen kann, indem man bloss für n eine hinreichend grosse Zahl nimmt, so begeht man keinen grossen Fehler, wenn man annimmt, dass $r \times r_1$ ein Mittelwert zwischen r^2 und $r_1{}^2$ ist; daher kann man die Durchschnittskraft längs des kurzen Weges von r nach $r_1 = \frac{q}{rr_1}$ setzen. Folglich ist die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man von r_1 nach r übergeht:

$$\frac{q}{rr_1}(r_1 - r) = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Unter derselben Voraussetzung ergibt sich für die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man von r_2 nach r_1 übergeht:

$$q\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

und für die Arbeit von r_3 nach r_2:

$$q\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right) \text{ etc.}$$

Auf diese Weise ergeben sich n Gleichungen, deren letzte die Arbeit ausdrückt, welche verrichtet wird, wenn man von r' zu r_{n-1} übergeht, nämlich

$$q\left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r'}\right).$$

Indem man alle diese Teile der Arbeit addiert, fallen die Zwischenwerte von r weg, und es ergibt sich für die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man von Q nach P übergeht

$$V_P - V_Q = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right).$$

Nimmt man ferner an, dass Q einen unendlich grossen Abstand von A habe, so wird r' unendlich gross, und $\frac{1}{r'} = 0$. In diesem Falle geht die Gleichung über in:

$$V_P = \frac{q}{r}.$$

Hätte man statt einer Elektrizitätsmenge q mehrere Ladungen q', q'', q''' . . . . etc., mit den resp. Abständen r', r'', r''' . . . . etc. von A, so ist endlich

Digitized by Google

$$V_P = \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \frac{q'''}{r'''} + \ldots \text{ etc}$$

oder $V_P = \Sigma \frac{q}{r}$, was zu beweisen war.

239. Null-Potential. In einem Punkte, der von allen elektrischen Körpern unendlich weit entfernt ist, würde man überhaupt keine elektrischen Kräfte haben, und das Potential würde den Wert Null haben. Aus Bequemlichkeitsrücksichten ist es jedoch üblich, das jeweilige Potential der Erde als einen willkürlich gewählten Nullpunkt zu betrachten, ebenso wie man die Oberfläche des Meeres zweckmässig als Nullpunkt betrachtet, von welchem aus man Höhen oder Tiefen misst.

240. Potentialdifferenz. Da das Potential die Arbeit vorstellt, welche an einer positiven Einheit verrichtet werden muss, um dieselbe aus unendlicher Entfernung herbeizuschaffen, so ist die *Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten die Arbeit, welche an oder von einer + elektrischen Einheit zu verrichten ist, um dieselbe von dem einen Punkte nach dem andern zu schaffen.* Stellt z. B. V_P das Potential im Punkte P dar, und V_Q das Potential in einem andern Punkte Q, so bezeichnet die Potentialdifferenz $V_P - V_Q$ die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um die + Einheit von Q nach P zu bewegen. Es ist zu beachten, dass dieser Wert nur von den Werten des Potentials in P und Q abhängt, und nicht von den Werten des Potentials in zwischenliegenden Punkten, und dass folglich die verrichtete Arbeit dieselbe ist, gleichviel, auf welchem Wege der Körper sich von Q nach P bewegt. Ebenso verhält es sich mit dem Aufwande an Energie. Wird ein Kilogramm der anziehenden Kraft der Erde entgegen von einem Punkte nach einem andern höher gelegenen gehoben, so ist der Aufwand an Energie derselbe, auf welchem Wege das Kilo auch emporgehoben werden möge.

241. Elektrische Kraft. Die Definition von »Arbeit« ist: Produkt aus der überwundenen Kraft und dem Wege, auf wel-

Digitized by Google

chem die Kraft überwunden ist, oder **Arbeit = Kraft × Weg**, auf welchem dieselbe überwunden wird.

Wenn also die Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten die Arbeit ist, welche verrichtet wird, um unsere + Einheit von dem einen Punkte zum andern zu bewegen, so folgt, dass die mittlere *elektrische Kraft* zwischen jenen Punkten gefunden wird, wenn man die verrichtete Arbeit durch den Abstand dieser Punkte dividiert, oder $\frac{V_P - V_Q}{PQ} = f$ (gleich der mittleren elektrischen Kraft längs der Linie PQ). Die (mittlere) elektrische Kraft ist daher das Verhältnis der Zu- oder Abnahme des Potentials pro Längeneinheit. Liegen P und Q nahe zusammen, so ist die Kraft thatsächlich zwischen P und Q gleichförmig.

242. Oberflächen von gleichem Potential. Eine auf einer kleinen Kugel angesammelte elektrische Ladung wirkt auf äussere Körper so, als ob die ganze Ladung im Mittelpunkte der Kugel vereinigt wäre [1]). Wir haben gesehen, dass die von einer solchen Ladung ausgeübte Kraft in einiger Entfernung von der Kugel abnimmt, indem die Kraft in demselben Verhältnisse abnimmt, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. Doch ist die Kraft gleich gross in allen Punkten, welche von der kleinen geladenen Kugel gleich weit entfernt sind. Ebenso ist das Potential dasselbe in allen Punkten, welche von der geladenen Kugel gleich weit entfernt sind. Wenn der Punkt A (Fig. 96) die mit q Einheiten der Elektrizität geladene Kugel vorstellt, so ist das Potential im Punkte P, welches wir V_P nennen wollen, gleich $\frac{q}{r}$, wo r die Entfernung zwischen A und P bedeutet. Nehmen wir irgend einen andern Punkt in derselben

1) Der Leser muss beachten, dass dies aufhört richtig zu sein, wenn andere Ladungen der Kugel genähert werden, denn in diesem Falle ist die Elektrizität nicht mehr gleichförmig über ihre Oberfläche verteilt. Aus diesem Grunde haben wir bei der Beschreibung der Messung elektrischer Kräfte mit der Drehwaage gesagt, dass »die Kugeln im Vergleich zum Abstande derselben sehr klein sein müssten«.

Digitized by Google

Entfernung von A, so ist sein Potential ebenfalls $\frac{q}{r}$. Nun liegen alle Punkte, welche von A denselben Abstand wie P haben, auf der Oberfläche einer Kugel, deren Mittelpunkt in A liegt, und welche in Fig. 97 durch den durch P gezogenen Kreis

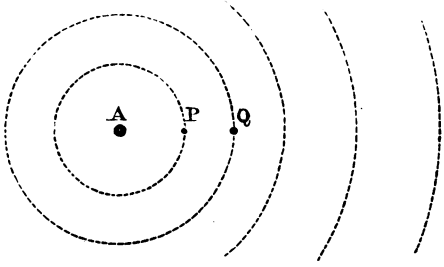

Fig. 97.

dargestellt wird. Auf diesem ganzen Kreise hat das Potential gleiche Werte, und dieser Kreis stellt daher eine **Oberfläche von gleichem Potential** dar. Die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um eine + Einheit aus unendlicher Entfernung herbei zu schaffen, ist dieselbe, gleichviel, bis zu welchem Punkte dieser Oberfläche von gleichem Potential die Einheit bewegt wird; und um dieselbe von einem Punkte der Oberfläche bis zu einem andern Punkte derselben zu bewegen, ist keine weitere Ueberwindung der elektrischen Kräfte erforderlich, und bedarf daher keines weitern Aufwandes an Arbeit. In einer andern Entfernung, z. B. im Punkte Q, hat das Potential einen andern Wert, und es lässt sich durch diesen Punkt eine andere Oberfläche von gleichem Potential legen. Nehmen wir an, dass wir die Entfernung des Punktes Q von P so wählten, dass es eines Aufwandes gerade einer *Arbeitseinheit* (in Betreff der Definition einer Arbeitseinheit sehe man die Anmerkung über Einheiten am Schlusse dieser Vorlesung) bedürfte, um eine Einheit positiver Elektrizität der abstossenden Kraft von A entgegen zu bewegen, so haben wir die *Einheit der Potentialdifferenz* zwischen den durch Q und P gelegten Oberflächen, und es ist eine *Ar-*

Digitized by Google

beitseinheit erforderlich, um eine + Einheit von einem Punkte der einen Oberfläche nach einem beliebigen Punkte der andern Oberfläche zu bewegen. Auf gleiche Weise könnten wir ein ganzes *System* von Flächen gleichen Potentials um den Punkt A konstruieren, indem wir sie in solchen Entfernungen nehmen, dass zwischen jeder von ihnen und der nächstfolgenden eine Einheit der Potentialdifferenz liegt. Die Abstände derselben würden immer grösser werden, denn da die Kraft abnimmt, je weiter man sich von A entfernt, so hat die + Einheit, um eine Arbeitseinheit zu verrichten, einen längern Weg, der immer schwächer werdenden entgegenwirkenden Kraft entgegen, zurückzulegen.

Die Gestalt der Oberflächen gleichen Potentials um zwei kleine elektrische Körper, welche nahe bei einander liegen, würde nicht kugelförmig sein; und die Oberflächen gleichen Potentials um eine Anzahl nahe bei einander befindlicher elektrischer Körper würde von sehr unregelmässiger Gestalt sein.

243. **Kraftlinien.** Die elektrische Kraft, ob anziehend oder abstossend, wirkt in den Oberflächen gleichen Potentials stets senkrecht zur Oberfläche. Diejenigen Linien, welche die Richtung der resultierenden elektrischen Kräfte angeben, nennt man bisweilen Linien der elektrischen Induktion. Für den Fall einer einzelnen elektrischen Kugel würden die Kraftlinien gerade Linien sein, nämlich die Radien des Systems der Oberflächen gleichen Potentials. Im Allgemeinen sind jedoch die Kraftlinien krumme Linien; in diesem Falle würde die Resultierende in einem beliebigen Punkte die Richtung der Tangente haben, welche sich in diesem Punkte an die Kurve legen lässt. Zwei Kraftlinien können sich nicht durchschneiden, denn die Resultierende in einem Punkte kann nicht gleichzeitig nach zwei Richtungen wirken. Die positive Richtung längs einer Kraftlinie ist diejenige Richtung, nach welcher ein kleiner mit + Elektrizität geladener Körper durch die elektrische Kraft getrieben würde, wenn derselbe frei beweglich wäre. Ein von einer Anzahl von Kraftlinien begrenzter Raum wird bisweilen ein *Kraft-*

Digitized by Google

kanal genannt. So kann man sich z. B. den ganzen Raum rings um eine kleine isolierte elektrische Kugel in eine Anzahl kegelförmiger Kanäle geteilt denken, von denen jeder seine Spitze im Mittelpunkte der Kugel hat. Die gesamte elektrische Kraft, welche durch einen beliebigen Querschnitt eines Kraftkanals hindurch ausgeübt wird, ist konstant, gleichviel, an welcher Stelle man den Querschnitt nimmt.

244. Potential innerhalb eines geschlossenen Konduktors. Die in den Art. 29 bis 32 angeführten Versuche beweisen mit grosser Bestimmtheit, dass *innerhalb eines geschlossenen Konduktors keine elektrische Kraft* existiert. Nun haben wir oben nachgewiesen, dass die elektrische Kraft die Zu- oder Abnahme des Potentials pro Längeneinheit ist. Ist keine elektrische Kraft vorhanden, so hat man auch keine Zu- oder Abnahme des Potentials. Das Potential innerhalb eines geschlossenen Konduktors (z. B. innerhalb einer hohlen Kugel) ist daher für alle Punkte des Innern konstant, nämlich dasselbe wie das Potential der Oberfläche. *Die Oberfläche eines geschlossenen Konduktors ist daher notwendig eine Oberfläche gleichen Potentials.* Wäre dieselbe nicht von ein und demselben Potential, so würde ein Abfliessen der Elektrizität vom höhern Potential zu dem niedrigeren stattfinden, wodurch sofort Gleichgewicht hergestellt und die ganze Oberfläche auf ein Potential gebracht würde. Die Kraft eines elektrischen Systems, Arbeit zu verrichten, hängt nicht von der zufälligen Oberflächendichte in einem beliebigen Punkte ab. Wie wir wissen, zeigen z. B. die entgegengesetzten Enden eines isolierten Konduktors, welchem ein elektrischer Körper genähert wird, induzierte Ladungen entgegengesetzter Art. Die Erklärung dieses Paradoxon besteht darin, dass das Potential in dem Raume um den geladenen Körper nicht gleichförmig ist. Nehmen wir an, dass der Körper eine + Ladung hat, so ist das Potential in seiner Nähe grösser, als in dem Raume, der weiter von ihm entfernt ist. Dasjenige Ende des isolierten Konduktors, welches der Ladung am nächsten ist, befindet sich in einer Region von hohem Potential, während das entfernte Ende in einer Region

Digitized by Google

von niedrigem Potential ist. Als ein Ganzes wird der Konduktor ein mittleres Potential annehmen, welches in bezug auf das Potential des umgebenden Mediums negativ am nahen Ende und positiv am entfernten Ende erscheinen wird.

245. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate. Eine wichtige Folgerung ergibt sich aus dem Nichtvorhandensein einer elektrischen Kraft innerhalb eines geschlossenen Konduktors. Diese Thatsache setzt uns in den Stand, die notwendige Wahrheit des Gesetzes der umgekehrten Quadrate nachzuweisen, welches zuerst experimentell, obgleich nur annähernd, von Coulomb mittelst der Torsionswaage nachgewiesen wurde. Denken wir uns einen Punkt P irgendwo innerhalb einer hohlen, mit Elektrizität geladenen Kugel (Fig. 98). Die Ladung ist über die ganze Kugel gleichmässig verteilt und die Elektrizitätsmenge auf einem kleinen Teile ihrer Oberfläche ist dem Flächeninhalte desselben proportional. Betrachten wir einen kleinen Teil AB der Oberfläche. Die Ladung auf AB würde eine +, in P befindliche Einheit mit einer gewissen Kraft abstossen. Wir ziehen nun durch P die Linien AD und BC, und betrachten diese als die Grenzen eines kleinen Doppelkegels, dessen Spitze in P liegt; die kleine Fläche CD stellt die Begrenzung des untern Kegels dar, und die Elektrizität auf CD wirkt ebenfalls auf die in P befindliche + Einheit und stösst dieselbe ab. Nun sind diese Oberflächen AB und CD und ihre Ladungen den *Quadraten* ihrer bezüglichen Abstände von P direkt proportional. Heben sich also die Kräfte, welche sie auf P ausüben, genau gegenseitig auf (wie der Versuch es zeigt), so ist klar, dass die elektrische Kraft im *umgekehrten Verhältnis der Quadrate der Entfernungen* abnehmen muss; denn die ganze Oberfläche der Kugel können wir uns durch Kegel, deren Spitzen in P liegen, zerlegt denken.

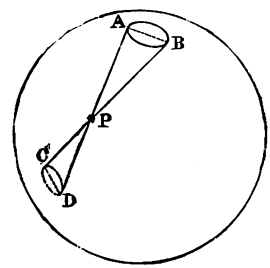

Fig. 98.

Digitized by Google

Diese Schlussweise lässt sich auch auf hohle Konduktoren von beliebiger Gestalt ausdehnen.

246. Kapazität. In der vierten Vorlesung wurde der Leser mit einigen elementaren Begriffen über die Kapazität der Konduktoren bekannt gemacht. Wir sind jetzt so weit vorgeschritten, um die genaue Definition geben zu können. Die elektrostatische **Kapazität** eines Konduktors wird *gemessen durch die Elektrizitätsmenge, welche ihm mitgeteilt werden muss, um sein Potential von Null bis zur Einheit zu erhöhen.* Ein kleiner Konduktor, wie z. B. eine isolierte Kugel von der Grösse einer Erbse, bedarf noch nicht einer elektrischen Einheit, um sein Potential von o auf 1 zu erhöhen; seine Kapazität ist deshalb gering — während eine grosse Kugel auch eine grosse Menge erfordert, um ihr Potential bis zu demselben Grade zu erhöhen, und wir würden ihr deshalb eine grosse Kapazität beizulegen haben. Bezeichnet C die Kapazität und Q eine Elektrizitätsmenge, so ist

$$C = \frac{Q}{V} \text{ und } CV = Q.$$

In Worten heisst dies: Die Elektrizität, welche erforderlich ist, um einen gegebenen Konduktor bis zu einem gegebenen Potential zu laden, ist numerisch gleich dem Produkte der Kapazität und des Potentials, bis zu welchem derselbe gebracht wird.

247. Die Einheit der Kapazität. Von einem Konduktor, welcher bloss eine Einheit Elektrizität erforderte, damit sein Potential von o auf 1 erhöht würde, würden wir sagen, dass er *die Einheit der Kapazität* besitzt. Eine Kugel von einem Zentimeter Radius besitzt die Einheit der Kapazität; denn wird dieselbe mit einer Menge gleich der Einheit geladen, so wirkt diese Ladung so, als ob sie im Mittelpunkte der Kugel vereinigt wäre. An ihrer Oberfläche, welche vom Mittelpunkte einen Zentimeter entfernt ist, ist das Potential, welches durch $\frac{q}{r}$ gemessen wird, gleich eins. Da nun die Menge eins die Kugel auf ein Potential 1 bringt, so besitzt diese also die Ein-

Digitized by Google

heit der Kapazität. *Die Kapazitäten von Kugeln sind ihren Radien proportional.* Demnach hat eine Kugel von einem Meter Radius eine Kapazität gleich 100. Die Erde hat eine Kapazität von ungefähr 630 Millionen (in elektrostatischen Einheiten). Die Kapazitäten von Konduktoren, welche eine andere Gestalt haben, zu berechnen, ist fast unmöglich. Es ist zu beachten, dass die Kapazität einer Kugel, wie im obigen Falle, nur dann ihre Kapazität wirklich ausdrückt, wenn sie von andern Konduktoren oder elektrischen Ladungen sehr weit entfernt ist. Die Kapazität eines Konduktors wird erhöht, wenn man demselben eine Ladung entgegengesetzter Art nahe bringt; denn das Potential an der Oberfläche des Konduktors ist die Summe des Potentials, welches von seiner eigenen Ladung herrührt, und des Potentials von entgegengesetztem Zeichen, welches von der benachbarten Ladung herrührt. Um daher das resultierende Potential auf die Einheit zu erheben, muss demselben eine grössere elektrische Menge zugeführt werden, oder mit andern Worten, seine Kapazität ist grösser. Dies ist die richtige Erklärung der Wirkungsweise der Leydener Flasche und anderer Akkumulatoren, und der Leser darf dies nicht ausser Acht lassen, wenn er in der 22. Vorlesung zur Betrachtung der Theorie der Akkumulatoren schreitet.

248. Oberflächendichte [1]). Diesen Ausdruck wandte Coulomb an, um damit die Elektrizitätsmenge auf der Flächen-

1) Bisweilen gebraucht man das Wort Spannung für denjenigen Begriff, welcher hier genau nach Coulomb definiert ist. Der Ausdruck Spannung ist jedoch unglücklich gewählt; und derselbe wird in Lehrbüchern so häufig falsch angewendet (er bezeichnet hier nicht allein Oberflächendichte, sondern auch Potential, und sogar elektrische Kraft, d. h. die mechanische Kraft, welche die Elektrizität auf einen materiellen Körper ausübt), so dass wir den Ausdruck überhaupt vermeiden. Von grossem Werte würde derselbe dann sein, wenn wir denselben annehmen könnten, um bloss die von angehäuften Ladungen herrührende mechanische Spannung längs eines dielektrischen Körpers zu bezeichnen; so lange jedoch die oben erwähnte Konfusion besteht, ist es besser, den Ausdruck überhaupt ganz fallen zu lassen, und der Leser hat eine Sache weniger zu lernen — und zu verlernen.

Digitized by Google

einheit in irgend einem Punkte einer Oberfläche zu bezeichnen. In der 4. Vorlesung wurde erwähnt, dass eine elektrische Ladung sich niemals gleichförmig auf einem Konduktor verteilt, der Fall einer isolierten Kugel ausgenommen. Ist die Verteilung ungleich, so kann die Dichte in irgend einem Punkte der Oberfläche dadurch ausgedrückt werden, dass man diejenige elektrische Menge betrachtet, welche auf einer kleinen Flächeneinheit in jenem Punkte vorhanden ist. Bedeutet Q die auf der kleinen Oberfläche befindliche Elektrizität, und S den Inhalt der kleinen Oberfläche, so ist die Oberflächendichte ρ durch die Gleichung gegeben:

$$\rho = \frac{Q}{S}.$$

In trockener Luft ist die Grenze der möglichen Elektrisierung erreicht, wenn die Dichte den Wert von ungefähr 20 elektrischen Einheiten pro Quadratzentimeter erreicht. Wird ein Körper in höherm Grade elektrisiert, so entweicht die Elektrizität in die Luft in Gestalt von »Funken« und »Strahlenbüscheln«. In dem Falle einer *gleichmässigen* Verteilung auf einer Oberfläche (wie z. B. bei der Kugel oder wie sie annähernd auch bei einer flachen Scheibe erreicht werden kann, um welche ein unter dem Namen »Schutzring« bekannter Ring gelegt ist) findet man die Dichte, indem man die gesamte Menge der Ladung durch die ganze Oberfläche dividiert.

249. Oberflächendichte auf einer Kugel. Die Oberfläche einer Kugel vom Radius r ist gleich $4\pi r^2$. Wird dieser Kugel also die Ladung Q erteilt, so ist die Oberflächendichte an jeder Stelle der Kugel $\rho = \frac{Q}{4\pi r^2}$, oder, wenn wir die Oberflächendichte kennen, so ist die Ladung $Q = 4\pi r^2 \rho$.

Die Oberflächendichte auf *2 Kugeln*, welche durch einen dünnen Draht verbunden sind, ist von besonderer Wichtigkeit. Sind die Kugeln ungleich, so verteilen sich die Ladungen auf ihnen im Verhältnis ihrer Kapazitäten (vergl. Art. 37), d. h. im Verhältnis ihrer Radien. Sind die Radien der Kugeln gleich 2

Digitized by Google

und 1, so ist auch das Verhältnis ihrer Ladungen wie 2 zu 1. Ihre resp. Dichtigkeiten findet man aber, indem man die Elektrizitätsmenge auf jeder Kugel durch ihre Oberfläche dividiert. Die Oberflächen sind aber den Quadraten der Radien proportional, verhalten sich also wie 4 : 1; folglich verhalten sich die Dichtigkeiten wie 1 : 2 oder *umgekehrt wie die Radien.* Ist nun eine dieser Kugeln sehr klein — nicht grösser als ein Punkt — so ist die Dichte auf derselben verhältnismässig unendlich gross, so gross, dass die Luftteilchen, welche mit derselben in Berührung kommen, die Ladung durch Leitung schnell weiter führen. Hieraus erklärt sich die *Wirkung von* **Spitzen** beim Ausladen von Konduktoren, worauf im ersten Kapitel, Art. 35 c, 42 und 43 hingewiesen wurde.

250. Elektrische Bilder. Bringt man q + elektrische Einheiten in einen Punkt in der Nähe einer nicht elektrischen leitenden Kugel vom Radius r, im Abstande d von ihrem Mittelpunkte, so lässt sich mathematisch nachweisen, dass die negative induzierte Ladung $-\frac{r}{d} \cdot q$ beträgt, und über den nächsten Teil der Kugeloberfläche so verbreitet ist, dass die Oberflächendichte dem Cubus der Entfernung jenes Punktes umgekehrt proportional ist. W. Thomson wies nach, dass in Betreff aller äussern Punkte das Potential dieser besondern Verteilung auf der Oberfläche genau dasselbe wäre, als wenn diese ganze negative Ladung in einem innern Punkte im Abstande $r - \frac{r^2}{d}$ hinter der Oberfläche vereinigt wäre. Einen solchen Punkt können wir als das virtuelle Bild des äussern Punktes ansehen, gerade so wie wir in der Optik gewisse Punkte hinter den Spiegeln als die virtuellen Bilder der äussern Punkte ansehen, von denen die Lichtstrahlen ausgehen. Maxwell stellte die folgende **Definition** für ein elektrisches Bild auf: *Ein elektrisches Bild ist ein elektrischer Punkt (oder Punktesystem) auf einer Seite einer Oberfläche, welcher auf der andern Seite jener Oberfläche dieselbe elektrische Wirkung hervorbringen würde, welche die thatsäch-*

Digitized by Google

liche Elektrisierung jener Oberfläche wirklich hervorbringt. Eine + elektrische Ladung, welche einen Zentimeter von einer dünnen Metallscheibe entfernt ist, induziert auf derselben eine negative Ladung, welche sich auf das benachbarte Gebiet der Scheibe verteilt (mit einer Dichtigkeit, welche dem Cubus des Abstandes von jenem Punkte umgekehrt proportional ist); aber die elektrische Wirkung dieser Verteilung würde genau durch ihr »Bild« dargestellt, nämlich durch eine gleich grosse Menge negativer Elektrizität, die sich einen Zentimeter hinter der Scheibe befindet. Man hat vielfache schöne mathematische Anwendungen dieser Methode gemacht, welche es ermöglicht, die Verteilung in schwierigen Fällen zu berechnen, wie z. B. die Verteilung der Ladung an der innern Fläche einer Hohlkugel.

251. Von der elektrischen Kraft, welche eine geladene Kugel auf einen Punkt ihrer Umgebung ausübt. Weiter oben hat sich ergeben, dass die Elektrizitätsmenge Q, welche sich auf einer bis zur Oberflächendichte ρ geladenen Kugel befindet,

$$Q = 4\pi r^2 . \rho$$

ist, und es ist jetzt die Aufgabe zu lösen, die Kraft zu finden, welche diese Ladung auf eine positive elektrische Einheit ausübt, die sich in einem der Oberfläche der Kugel unendlich nahe liegenden Punkte befindet. Die Ladung auf der Kugel wirkt so, als ob sie im Mittelpunkte vereinigt wäre. Der Abstand zwischen den beiden Mengen ist also $= r$, und nach dem Coulomb'schen Gesetze ist die Kraft $f = \frac{Q \times 1}{r^2} = \frac{4\pi r^2 \rho}{r^2}$ $= 4\pi\rho$.

Dieses wichtige Ergebnis lässt sich auf folgende Weise in Worten ausdrücken: *Die Kraft (in Dyn gemessen), welche eine geladene Kugel auf eine ihrer Oberfläche unendlich nahe befindliche Einheit der Elektrizität ausübt, ist numerisch gleich der Oberflächendichte der Ladung, multipliziert mit der Zahl 4π.*

252. Von der elektrischen Kraft, welche eine ge-

Digitized by Google

ladene Platte von unbegrenzter Ausdehnung auf einen Punkt ihrer Umgebung ausübt. Angenommen, eine Platte von unbegrenzter Ausdehnung sei so geladen, dass sie die Oberflächendichte ρ hat. Diese Oberflächendichte ist gleichmässig, da die Kanten der Platte so weit entfernt sein sollen, dass dieselben keinen Einfluss ausüben. Dann lässt sich nachweisen, *dass die Kraft, welche eine solche Platte auf eine Einheit an irgend einer Stelle ihrer Nachbarschaft ausübt, numerisch (in Dyn) durch $2\pi\rho$ ausgedrückt wird.* Dieser Ausdruck nimmt auf den entgegengesetzten Seiten der Platte verschiedene Vorzeichen an, und ist $+$ auf der einen und $-$ auf der andern Seite der Platte, da in dem einen Falle die Kraft das Bestreben hat, die Einheit von rechts nach links zu bewegen, im andern Falle von links nach rechts. Wir müssen deshalb beachten, dass der Wert der Kraft sich um $4\pi\rho$ ändert, wenn der Punkt durch die Fläche hindurchgeht. Dasselbe galt von der geladenen Kugel, wo die Kraft ausserhalb $= 4\pi\rho$ und innerhalb $= 0$ war. Dasselbe gilt von allen geladenen Oberflächen. Diese beiden Sätze sind in der Theorie der Elektrostatik von der grössten Wichtigkeit.

253. Der elementare geometrische Beweis des letzteren Satzes ist folgender:

Es wird die elektrische Kraft gesucht, welche in irgend einem Punkte in beliebiger Entfernung von einer Ebene von unendlich grosser Ausdehnung wirkt, welche bis zur Oberflächendichte ρ geladen ist.

Es sei P der Punkt und $PX = a$ das Lot auf die Ebene. Dann betrachte man einen kleinen Kegel, dessen Spitze in P liegt. Es sei ω der Flächenwinkel dieses Kegels und r die Länge desselben und Θ der Winkel, welchen seine Achse mit a einschliesst. Der Kegel trifft die Ebene schief und konstruiert man hier einen geraden Querschnitt, so ist der Winkel beider Querschnitte $= \Theta$. Nun ist der Flächenwinkel ω zufolge der Definition

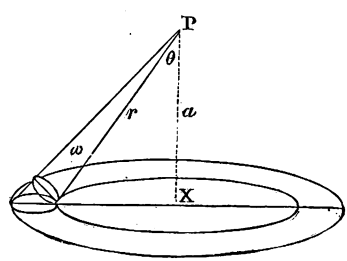

Fig. 99.

$$\omega = \frac{\text{Fläche des geraden Querschnitts}}{r^2}$$

Digitized by Google

folglich die Fläche des schiefen Querschnitts $= r^2\omega \times \frac{1}{\cos\Theta}$, mithin die Ladung auf dem schiefen Querschnitte $= \frac{r^2\omega\rho}{\cos\Theta}$; befände sich also in P eine positive elektrische Einheit, so würde diese kleine Ladung auf dieselbe eine Kraft ausüben $= \frac{r^2\omega\rho}{\cos\Theta} \times 1 : r^2 = \frac{\omega\rho}{\cos\Theta}$.

Nun zerlege man diese Kraft in 2 Teile, von denen der eine längs der Ebene, der andere längs a, senkrecht zur Ebene wirkt. Die Normalkomponente längs a ist $\cos\Theta \cdot \frac{\omega\rho}{\cos\Theta} = \omega\rho$

Denkt man sich dann die ganze Ebene auf ähnliche Weise in kleine Flächen zerlegt, so ergeben sich lauter kleine Kegel, deren Spitzen in P sind. Betrachtet man eine unendliche grosse Zahl solcher kleinen Kegel, die überall an einander stossen, und zerlegt ihre Kräfte auf ähnliche Weise, so ergibt sich, dass die Komponenten längs der Ebene sich gegenseitig aufheben, während die Normalkomponenten, oder die längs a wirkenden Kräfte, gleich der Summe ihrer sämtlichen Flächenwinkel sind, multipliziert mit der Oberflächendichte; oder

$$\text{Gesamtresultierende längs } a = \Sigma\omega\rho.$$

Nun ist aber der gesamte Flächenwinkel zwischen einem Punkte und einer unendlich grossen Ebene $= 2\pi$, denn derselbe umfasst eine ganze Halbkugel; folglich

$$\text{Gesamtresultierende} = 2\pi\rho.$$

Anmerkung über fundamentale und abgeleitete Einheiten.

254. Fundamentale Einheiten. Alle physikalischen Grössen, wie Kraft, Geschwindigkeit etc., lassen sich mit Hilfe der 3 fundamentalen Grössen: Länge, Masse und Zeit, ausdrücken. Jede dieser Grössen muss durch eine besondere Einheit gemessen werden.

Dasjenige Einheitssystem, welches fast einstimmig angenommen wurde und in diesen Vorlesungen ausschliesslich zur Anwendung gelangt, ist das sogenannte »Zentimeter-Gramm-Sekunden«-System, bei welchem die fundamentalen Einheiten sind:

Das Zentimeter als Einheit der *Länge.*
Das Gramm als Einheit der *Masse.*
Die Sekunde als Einheit der *Zeit.*

Das Zentimeter ist der tausendmillionte Teil $\left(= \frac{1}{1{,}000{,}000{,}000}\right)$ eines Erdquadranten.

Digitized by Google

Das *Meter* ist 100 Zentimeter.

Das *Kilometer* ist 1000 Meter.

Das *Millimeter* ist der zehnte Teil eines Zentimeters.

Das *Gramm* ist das Gewicht eines Kubikzentimeters Wasser bei 4^0 C.

Das *Kilogramm* ist 1000 Gramm.

255. Abgeleitete Einheiten.

Fläche. Die Flächeneinheit ist das Quadratzentimeter.

Volumen. Die Volumeneinheit ist das Kubikzentimeter.

Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitseinheit ist die Geschwindigkeit eines Körpers, der den Weg 1 in der Zeit 1 zurücklegt, oder *die Geschwindigkeit eines Zentimeters pro Sekunde.*

Beschleunigung. Die Einheit der Beschleunigung ist diejenige Beschleunigung, welche einem Körper in der Zeit 1 die Geschwindigkeit 1 erteilt, oder eine Beschleunigung von einem Zentimeter pro Sekunde in jeder Sekunde. Die Beschleunigung der Schwerkraft erteilt in einer Sekunde eine bedeutend grössere Geschwindigkeit, denn die Geschwindigkeit, welche sie frei fallenden Körpern erteilt, beträgt ungefähr 981 Zentimeter pro Sekunde. Dieser Wert ist in verschiedenen Breiten ein etwas anderer. In Berlin ist der Wert der Beschleunigung der Schwerkraft $g = 981{,}2$; am Aequator $g = 978{,}1$; am Nordpole $g = 983{,}1$.

Kraft. Die Krafteinheit ist diejenige Kraft, welche einer Masse von einem Gramm, während einer Wirkungsdauer von einer Sekunde, eine Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde erteilt. Die Krafteinheit heisst *Dyn.* Die Kraft, mit welcher die Erde eine Masse anzieht, heisst gewöhnlich das »Gewicht« dieser Masse, und der Wert desselben ist offenbar an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche verschieden. Die Kraft, mit welcher ein Körper gravitiert, d. h. sein Gewicht (in Dyn), wird gefunden, indem man seine Masse (in Gramm) mit dem Werte von g für den besondern Ort, wo die Kraft ausgeübt wird, multipliziert.

Arbeit. Die Arbeitseinheit ist diejenige Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man die Krafteinheit auf einem Wege von der Längeneinheit überwindet, d. h. wenn man einen Körper einen Zentimeter weit gegen eine Kraft von einem Dyn bewegt. Die Arbeitseinheit heisst *Erg.* Da das »Gewicht« eines Gramm $= 1 \times 981 = 981$ Dyn ist, so beträgt die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn ein Gramm einen Zentimeter hoch der Schwerkraft entgegengehoben wird, 981 Erg.

Energie. Die Einheit der Energie ist ebenfalls das Erg; denn die Energie eines Körpers wird durch die Arbeit gemessen, welche er verrichten kann.

Wärme. Die Wärmeinheit (bisweilen Calorie genannt) ist diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 Gramm Wasser von 0^0 bis 1^0 (C.) zu erwärmen; und das mechanische Aequivalent dieser Wärmemenge ist 42

Digitized by Google

Millionen Erg. Dieses ist der Wert des Joule'schen Aequivalentes, ausgedrückt in absolutem Maasse (C.G.S.). Vergl. auch Art. 367.

Diese Einheiten werden bisweilen »absolute« Einheiten genannt; wobei der von Gauss eingeführte Ausdruck absolut bedeutet, dass sie von der Grösse irgend eines besondern Instrumentes oder von dem Werte der Schwere an einem bestimmten Orte, sowie von andern willkürlichen Grössen unabhängig sind, ausgenommen von den 3 Normalmaassen der Länge, der Masse und der Zeit. Es ist jedoch besser, den geeigneteren Namen C.G.S. Einheiten auf sie anzuwenden, da sie vom Zentimeter, vom Gramm und von der Sekunde abgeleitet werden.

256. Elektrische Einheiten. Man unterscheidet zwei Systeme elektrischer Einheiten, welche von den fundamentalen C.G.S. Einheiten abgeleitet werden, von denen das eine von der Kraft ausgeht, welche zwischen 2 elektrischen Mengen ausgeübt wird, das andere dagegen von der Kraft, welche 2 Magnetpole auf einander ausüben. Das erste System heisst die *elektrostatischen* Einheiten, das zweite die *elektromagnetischen* Einheiten. Die wichtige Beziehung zwischen beiden Systemen ist in der Anmerkung am Schlusse der 30. Vorlesung erläutert.

257. Elektrostatische Einheiten. Für die elektrostatischen Einheiten der Menge, des Potentials, der Kapazität etc. hat man keine besonderen Namen. Weshalb man die folgenden Werte als Einheiten angenommen hat, geht teils aus dem ersten, teils aus diesem Kapitel hervor.

Einheit der Menge. Die Einheit der Menge ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in einer Entfernung von einem Zentimeter von einer gleichen und gleichartigen Menge dieselbe mit einer Kraft von einem Dyn abstösst. (Art. 236.)

Potential. Da das Potential durch die Arbeit gemessen wird, welche verrichtet wird, wenn eine Einheit positiver Elektrizität den elektrischen Kräften entgegen bewegt wird, so wird die Einheit des Potentials durch die Einheit der Arbeit, das Erg, gemessen.

Einheit der Potentialdifferenz. Die Einheit der Potentialdifferenz besteht zwischen 2 Punkten, wenn eine Arbeitseinheit aufgewendet werden muss, um eine Einheit positiver Elektrizität der elektrischen Kraft entgegen von einem Punkte zum andern zu bewegen. (Art. 242.)

Einheit der Kapazität. Derjenige Konduktor besitzt die Einheit der Kapazität, welcher eine Ladung von einer elektrischen Einheit erfordert, um auf die Einheit des Potentials zu gelangen. Eine Kugel von einem Zentimeter Radius besitzt die Einheit der Kapazität. (Art. 247.)

Die Spezifische Induktive Kapazität wird in Art. 268 als das Verhältnis zweier elektrischen Mengen definiert. Die spezifische induktive Kapazität der Luft wird als Einheit genommen.

258. Dimensionen der Einheiten. Weiter oben haben wir voraus-

Digitized by Google

gesetzt, dass eine Geschwindigkeit in Zentimetern pro Sekunde ausgedrückt werden kann; denn die Geschwindigkeit ist das Verhältnis der Ortsveränderung zu der dazu gebrauchten Zeit, und es ist klar, dass, wenn die Ortsveränderung als eine Länge in Zentimetern gemessen werden kann, die Geschwindigkeit durch die Anzahl der Zentimeter gemessen wird, um welche sich der Körper in der Zeiteinheit fortbewegt. Es ist in der That unmöglich, eine Geschwindigkeit auszudrücken, wofern man sie nicht als den Quotienten einer bestimmten Anzahl Längeneinheiten dividiert durch eine bestimmte Anzahl Zeiteinheiten betrachtet. Mit andern Worten: Geschwindigkeit $= \frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}$; oder, wenn wir L als Länge und T als Zeit nehmen, $V = \frac{L}{T}$, wofür wir noch passender schreiben $V = L \cdot T^{-1}$. Da die Beschleunigung das Verhältnis der Geschwindigkeitsänderung zu der dazu erforderlichen Zeit ist, so haben wir in analoger Weise: $A = \frac{V}{T} = \frac{L}{T \cdot T} = \frac{L}{T^2} = L \cdot T^{-2}$.

Nun sind diese physikalischen Grössen, »Geschwindigkeit« und »Beschleunigung« bezüglich immer Grössen derselben Art, gleichviel ob wir das Zentimeter oder den Zoll oder die Meile als Längeneinheit, oder die Sekunde oder ein beliebiges anderes Intervall als Zeiteinheit nehmen. Daher sagen wir, dass diese abstrakten Gleichungen die »Dimensionen« jener Grössen in Bezug auf die fundamentalen Grössen Länge und Zeit ausdrücken. Wie eine einfache Ueberlegung zeigt, ergeben sich folgende Werte für die Dimensionen der verschiedenen oben erwähnten Einheiten:

	Einheiten.		Dimension.
	Fundamentale:		
l	Länge		L
m	Masse		M
t	Zeit		T
	Abgeleitete:		
	Fläche	$= L \times L =$	L^2
	Volumen	$= L \times L \times L =$	L^3
v	Geschwindigkeit	$= L : T =$	$L \cdot T^{-1}$
a	Beschleunigung	= Geschwindigkeit : Zeit =	$L \cdot T^{-2}$
f	Kraft = Masse	× Beschleunigung =	$M \cdot L \cdot T^{-2}$
	Arbeit = Kraft	× Länge =	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$

Digitized by Google

	Einheiten.	Dimension.
	Elektrostatische:	
q	Menge $= \sqrt{\text{Kraft} \times (\text{Entfernung})^2} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$
i	Strom = Menge : Zeit =	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$
V	Potential = Arbeit : Menge =	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
R	Widerstand = Potential : Strom =	$L^{-1} T^{1}$
C	Kapazität = Menge : Potential =	L
k	Spec. Ind. Kapazität = Menge : andere Menge	eine Zahl
	Elektromotorische Intensität = Kraft : Menge	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$

Die Dimensionen der magnetischen Einheiten findet man in der Anmerkung über magnetische Einheiten, Art. 324.

XXI. VORLESUNG: *Elektrometer.*

259. In der zweiten Vorlesung haben wir eine Anzahl von *Elektroskopen* oder solchen Apparaten beschrieben, mit deren Hilfe wir uns von dem Vorhandensein und der Art einer elektrischen Ladung überzeugen können; einige dieser Apparate hatten auch den Zweck, die ungefähre Grösse dieser Ladungen anzugeben, keiner von ihnen, mit Ausnahme der Torsionswaage, konnte jedoch als Instrument zur genauen Messung weder der *Grösse,* noch des *Potentials* einer gegebenen Ladung angesehen werden. *Ein Instrument, welches dazu dient, elektrostatische Potentialdifferenzen zu messen, heisst ein* **Elektrometer.** Solche Instrumente können auch dazu benutzt werden, um indirekt eine Elektrizitätsmenge zu messen, denn über die Grösse einer Ladung kann man sich dadurch Gewissheit verschaffen, dass man das Potential misst, auf welches sie einen Konduktor von bekannter Kapazität bringt. Die ersten Elektrometer versuchten die Elektrizitätsmengen direkt zu messen. Lane und Snow Harris konstruierten »Einheitsflaschen« d. h. kleine Leydener Flaschen, welche eine bestimmte Anzahl von Malen geladen und entladen

Digitized by Google

wurden, wenn man eine bestimmte Elektrizitätsmenge messen wollte. Das Entladungs-Goldblattelektroskop von Gaugain wurde zu ähnlichem Zwecke erfunden.

260. Abstossungs-Elektrometer. Die in Art. 15 beschriebene Torsionswaage misst Elektrizitätsmengen durch die Kräfte, welche die der beweglichen und der festen Kugel erteilten Ladungen auf einander ausüben. Dieselbe kann nur zur Messung abstossender Kräfte benutzt werden, denn für den Fall einer anziehenden Kraft ist der Gleichgewichtszustand unbeständig.

Ausser dem in der zweiten Vorlesung beschriebenen Goldblattelektroskop und dem Lane'schen Elektroskop gibt es noch eine Anzahl feinerer Elektrometer, welche auf dem Prinzip der Abstossung beruhen, und von denen einige mit der Torsionswaage Aehnlichkeit haben, insofern sie einen beweglichen, sich um eine zentrale Achse drehenden Arm haben. Unter ihnen verdienen die Elektrometer von Dellmann und Peltier Erwähnung; das letztere ist in Fig. 111 abgebildet, in der Vorlesung über Atmosphärische Elektrizität. Bei diesem Apparate trägt ein leichter, auf einer Spize schwebender Arm aus Aluminium ebenfalls einen kleinen Magnet, welcher ihn in den magnetischen Meridian einstellt. Ein fester, mit dem beweglichen in metallischer Berührung stehender Arm liegt ebenfalls in dem magnetischen Meridian. Eine diesem Apparate mitgeteilte Ladung erzeugt eine Abstossung zwischen dem festen und dem beweglichen Arme und veranlasst eine Winkelablenkung. Hier wird jedoch die Kraft nicht durch die Gegenwirkung der Torsion eines elastischen Fadens gemessen, noch durch die der Schwerkraft, sondern durch die richtende Kraft des Erdmagnetismus, welcher auf die kleine Nadel wirkt. Nun ist diese von der Intensität der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus an jenem Orte abhängig, ferner von dem magnetischen Moment der Nadel und von dem Sinus des Ablenkungswinkels. Ausserdem findet hier die Abstossung nicht zwischen 2 auf kleinen Kugeln befindlichen Ladungen statt, sondern zwischen dem

Digitized by Google

festen und dem beweglichen Arme. Um daher quantitative Werte für die Angaben dieses Elektrometers zu erhalten, ist es nötig, Vorversuche anzustellen, und die Gradablesungen der Winkelablenkung nach einer genauen Skala zu »calibrieren«.

261. Elektrometer mit Anziehungsscheibe. Snow Harris war der erste, welcher ein Elektrometer zur Messung der Anziehung zwischen einer elektrischen und einer unelektrischen Scheibe konstruierte; und den von ihm erfundenen Apparat kann man im allgemeinen als eine Waage zur *Abwägung* einer elektrischen Ladung bezeichnen. Genauer genommen, war es ein Apparat, welcher der Form nach einer Waage ähnlich war, die an dem einen Ende eine leichte Wagschale trug; am andern Ende hing eine Scheibe oberhalb einer festen, isolierten Scheibe, welcher die zu messende Ladung mitgeteilt wurde. Dieser Apparat hatte mancherlei Nachteile; der Hauptfehler rührte von der unregelmässigen Verteilung der Ladung auf der Scheibe her. Die von einem elektrischen Punkte ausgeübte Kraft nimmt ab, wie die *Quadrate* der Entfernungen zunehmen, da die Kraftlinien strahlenförmig verlaufen. Doch in dem Falle einer gleichmässig elektrisierten ebenen Oberfläche sind die Kraftlinien senkrecht zur Oberfläche und einander parallel, und die Kraft ist von dem Abstande unabhängig. Die Verteilung auf einer kleinen Kugel erfüllt nahezu die erste dieser Bedingungen. Die Verteilung auf einer dünnen Scheibe würde annähernd die letztere Bedingung erfüllen, falls nicht die Kanten der Scheibe, wo die Oberflächendichte bedeutend grösser ist, (vergl. Art. 35) einen störenden Einfluss ausübten. Aus diesem Grunde war Snow Harris' Elektrometer sehr unvollkommen.

W. Thomson hat verschiedene sehr wichtige Modifikationen an dem Elektrometer mit Anziehungsscheibe vorgenommen, indem er vor allen Dingen eine »Schutzringplatte« anbrachte und dafür sorgte, dass er mit einem bestimmten Normalpotential arbeitete. Es würde den Umfang dieser Vorlesungen überschreiten, wollten wir eine vollständige Beschreibung aller verschiedenen Formen der Elektrometer mit Anziehungsscheibe

Digitized by Google

geben; die wesentlichen Prinzipien derselben können wir jedoch sogleich erklären.

Die Scheibe C, deren Anziehung gemessen werden soll, wird innerhalb einer festen Schutzringplatte B (Fig. 100) aufgehängt, welche sie umgibt, ohne sie zu berühren, und welche

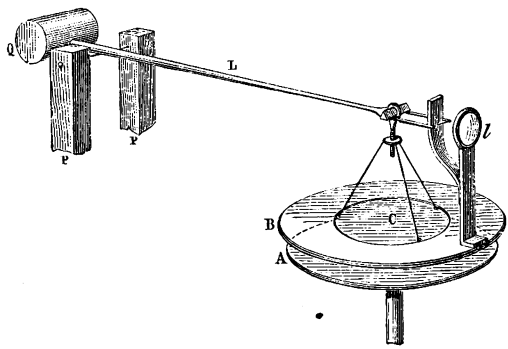

Fig. 100.

mit derselben durch einen dünnen Draht in metallischer Verbindung steht. Ein Hebel L trägt die Scheibe und ist mit einem Gegengewichte versehen; während der Aluminiumdraht, welcher als Zeiger dient, auch dazu benutzt werden kann, eine Torsionskraft zu erzeugen. Um zu erfahren, ob die untere Fläche der Scheibe mit der untern Fläche der Schutzringplatte genau in derselben Höhe steht, ist oberhalb ein kleiner Visierstab oder Index angebracht, und mit einer Linse *l* versehen, um die Angaben desselben zu beobachten. Unterhalb der Scheibe und des Schutzringes befindet sich eine zweite Scheibe A, welche auf einer isolierenden Stütze ruht. Diese untere Scheibe lässt sich nach Belieben durch eine Mikrometerschraube heben oder senken, wobei sehr darauf zu achten ist, dass der Mechanismus es gestattet, die Scheibe stets parallel zur Ebene der Schutzringplatte zu bewegen. Da nun die Scheibe und der Schutzring mit einander in metallischer Berührung stehen, so bilden sie thatsächlich eine einzige Oberfläche, und da die Unregelmässigkeiten in der Verteilung an den Kanten der Oberfläche

Digitized by Google

vorhanden sind, so ist die Verteilung auf der Oberfläche der Scheibe in Wirklichkeit gleichmässig. Jeder Anziehung der untern Scheibe auf die Platte könnte das Gleichgewicht gehalten werden, entweder durch Vermehrung des Gegengewichtes oder durch Tordierung des Drahtes; in der Praxis hat es sich jedoch als sehr bequem herausgestellt, dadurch Gleichgewicht herzustellen, dass man den Abstand der untern Scheibe so lange ändert, bis die elektrische Anziehung genau denjenigen Kräften (ob Torsions- oder Schwerkraft, welche auf das Gegengewicht wirkt) das Gleichgewicht hält, welche die Scheibe über das Niveau der Schutzringplatte zu heben bestrebt sind.

Auch die Theorie des Apparates ist einfach. Die Kraft F ausserhalb eines geladenen Konduktors ist $4\pi\rho$ (Art. 252); und da die elektrische Kraft dasselbe ist, wie die Aenderung des Potentials (Potentialabfall) pro Längeneinheit (Art. 241), so ist sie gleich $\frac{V}{D}$, wo V die Potentialdifferenz zwischen der obern und untern Platte und D ihren Abstand bedeutet; folglich: $\rho = \frac{V}{4\pi D}$. Bezeichnet S die Oberfläche der beweglichen Scheibe, so ist $S\rho$ die Grösse der Ladung auf derselben. Wir nehmen nun an, dass die Elektrizität auf der untern Platte dieselbe Dichte hat, aber von entgegengesetzter Art ist. Da ihre Dichte dann $-\rho$ ist, so übt sie auf eine in der Nähe der Scheibe befindliche $+$ Einheit eine Kraft $= -2\pi\rho$ aus; (doch da diese Kraft von der obern Seite der Platte ausgeübt wird, so müssen wir ihr Zeichen wieder in das entgegengesetzte verwandeln und $+2\pi\rho$ schreiben, wo das $+$ Zeichen auf eine Kraft deutet, welche eine $+$ Einheit nach unten zu bewegen strebt). Nun befinden sich auf der Scheibe $S\rho$ elektrische Einheiten; folglich ist die gesamte Anziehung auf die Scheibe

$$F = 2\pi\rho \times S\rho = 2\pi S\rho^2$$
$$= 2\pi S \frac{V^2}{16\pi^2 D^2}$$

Digitized by Google

oder $$F = \frac{SV^2}{8\pi D^2}$$

und folglich: $$V = D\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

Hieraus erkennen wir Folgendes: Bleibt die Kraft F während der Versuche ungeändert, *so ist die Potentialdifferenz zwischen den Platten einfach dem Abstande zwischen ihnen proportional,* wenn die Scheibe C sich im Gleichgewichte befindet. Die Grösse $\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$ können wir ein für alle mal als eine »Konstante« des Apparates ermitteln.

Bei den sorgfältiger gearbeiteten Apparaten, wie z. B. bei dem **»absoluten Elektrometer«** sind Scheibe und Schutzringplatte mit einem Metallgitter umgeben; und beide stehen mit einem Kondensator in Verbindung, um sie auf bekanntem Potential zu erhalten. Dies macht die Bestimmung des Nullpunktes überflüssig, denn dann sind die *Potentialdifferenzen den Differenzen der Mikrometerangaben proportional,* oder

$$V_1 - V_2 = (D_1 - D_2)\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

Der Kondensator ist bei diesen Apparaten mit einer Messvorrichtung versehen, die selbst eine Anziehungs-Scheibe ist, und welche anzeigt, wann derselbe auf das richtige Potential gebracht ist; ausserdem hat der Kondensator noch eine Ladungsvorrichtung (replenisher) welcher die Ladung verstärkt oder schwächt; derselbe besteht aus einer kleinen Konvektion-Induktions-Maschine (vergl. Art. 45).

262. Das Quadrant-Elektrometer. W. Thomson's Quadrant-Elektrometer ist eine ganz andere Art von Elektrometern, bei dem eine elektrische Hilfsladung Verwendung findet, welche der Nadel des Apparats vorher mitgeteilt worden ist. Die Nadel, welche aus einem dünnen, platten Metallstück besteht, welches horizontal an einem Faden oder dünnen Drahte aufgehängt, und in dieser Lage mit Elektrizität, beispielsweise mit +, geladen ist, wird von einer — Ladung angezogen, von einer

Digitized by Google

+ dagegen abgestossen; und diese Anziehung oder Abstossung ist um so stärker, je stärker diese Ladungen und die Ladung auf der Nadel sind. Vier Quadranten aus Messing sind horizontal unter der Nadel befestigt, ohne jedoch dieselbe oder einander zu berühren. Je 2 gegenüberstehende Quadranten sind durch feine Drähte mit einander verbunden.

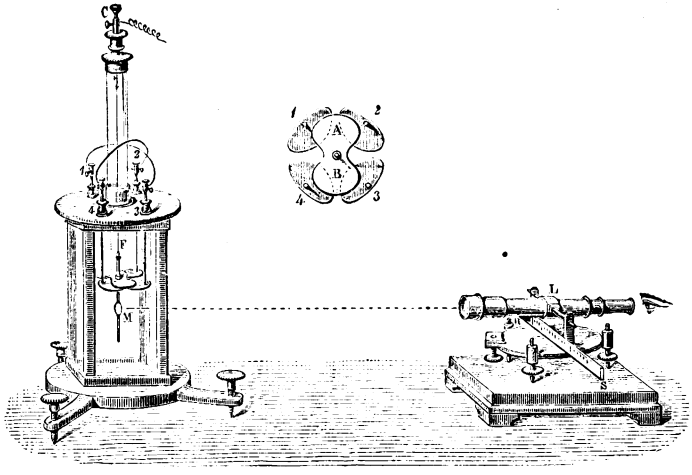

Fig. 101.

Fig. 101 zeigt eine sehr einfache Form des Quadrant-Elektrometers, wie dasselbe zu qualitativen Versuchen eingerichtet ist. Die 4 Quadranten sind von einem Glasgehäuse umgeben, und die Nadel, welche unterhalb einen leichten Spiegel M trägt, ist mittelst eines sehr feinen Metalldrahtes F an einem Torsionskreise C befestigt. Dieselbe wird bis zu einem bestimmten Potential elektrisiert, indem man sie durch einen an C befestigten Draht mit einer geladenen Leydener Flasche oder einem andern Kondensator in Verbindung bringt. Um die kleinsten Bewegungen der Nadel beobachten zu können, sind ein Fernrohr und eine Skala so aufgestellt, dass der durch das Fernrohr schauende Beobachter in dem kleinen Spiegel ein Bild des Nullpunkts der Skala erblickt. Die Drähte, welche den ersten und

Digitized by Google

dritten, sowie den zweiten und vierten Quadranten verbinden, sieht man oberhalb des Glasgehäuses. Die Nadel AB und die Quadranten 1 bis 4 sind in einer Nebenfigur besonders abgebildet. Wenn zwischen den Quadrantenpaaren die geringste Potentialdifferenz besteht, macht die Nadel, welche durch die Elastizität des Drahtes in ihrer Nullpunktslage gehalten wird, eine Drehung und zeigt auf diese Weise die Potentialdifferenz an. Sind diese Ablenkungen gering, so sind die Ablesungen an der Skala den Potentialdifferenzen nahezu proportional. Der Apparat besitzt eine solche Empfindlichkeit, dass er noch eine Potentialdifferenz zwischen den Quadranten anzeigt, welche $\frac{1}{70}$ von derjenigen des Daniell'schen Elementes beträgt.

Zum Zwecke sehr genauer Messungen hat man noch verschiedene Verbesserungen an dem Apparate angebracht. Man wendet 2 Quadrantenscheiben an, eine obere und eine untere, zwischen denen sich die Nadel befindet. An Stelle des Torsionsdrahtes findet sich eine empfindliche bifilare Aufhängung (Art. 118). Um die Ladung der Leydener Flasche zu erhalten, wird noch ein »Ladungsapparat« hinzugefügt; und eine »Anziehungs-Scheibe« ähnlich derjenigen des absoluten Elektrometers hat den Zweck, anzugeben, wann die Flasche das richtige Potential hat. Bei diesen Formen besteht die Flasche aus einem unterhalb der Quadranten stehenden Glasgefässe, welches von aussen mit Streifen aus Zinnfolie überzogen ist, und konzentrierte Schwefelsäure enthält, welche den doppelten Zweck hat, den Apparat durch Absorbierung der Feuchtigkeit trocken zu erhalten, und als innere Belegung der Flasche zu wirken. Auch kann man von einer Lampe einen Lichtfleck auf eine Skala mit Hilfe des kleinen Spiegels fallen lassen (wie dies beim Spiegelgalvanometer, Art. 202, beschrieben wurde). Ist der Apparat mit Ladungs- und Messvorrichtung versehen, so lassen sich die Messungen in absoluten Einheiten vornehmen, vorausgesetzt, dass man die »Konstante« des betreffenden Apparates einmal bestimmt hat (dieselbe ist von der Aufhängung der Nadel, von der Grösse und Stellung der Nadel und der

Digitized by Google

Quadranten, von dem Potential der Hilfsmessvorrichtung etc. abhängig).

263. Den Gebrauch des Apparates wollen wir durch ein Beispiel klar machen. Werden die beiden Enden eines dünnen Drahtes auf zwei verschiedenen Potentialen erhalten, so fliesst bekanntlich ein Strom durch den Draht; und wird das Potential an verschiedenen Stellen des Drahtes gemessen, so ergibt sich, dass dasselbe vollkommen gleichmässig von dem Ende mit hohem Potential bis zu dem Ende mit niedrigerem Potential abnimmt. In dem Punkte, welcher vom Ende um den vierten Teil der Länge des Drahtes entfernt ist, hat das Potential um den vierten Teil der gesamten Differenz abgenommen. Dies liesse sich dadurch beweisen, dass man die beiden Enden des Drahtes, durch welchen der Strom fliesst, mit den Enden des Quadrant-Elektrometers verbindet, wodurch dann das eine Quadrantenpaar auf dem hohen und das andere auf dem niedrigen Potential sein würde. Die Nadel würde sich drehen und eine bestimmte Ablenkung anzeigen. Hebt man jetzt die Verbindung zwischen dem einen Quadrantenpaare und dem Drahtende mit niedrigem Potential auf, und stellt statt dessen eine Verbindung zwischen dem Quadrantenpaare und einem Punkte her, welcher von demjenigen Ende des Drahtes, wo das hohe Potential ist, um $\frac{1}{4}$ der Drahtlänge entfernt ist, so zeigt die Nadel sofort an, dass die Potentialdifferenz nur den vierten Teil von vorher beträgt.

Oft wird das Quadrant-Elektrometer einfach als ein sehr empfindliches Elektroskop benutzt, und zwar in der Weise, dass man eine elektrische Potentialdifferenz dadurch bestimmt, dass man ihr durch eine gleiche Potentialdifferenz entgegengesetzter Art das Gleichgewicht hält. Man erkennt das Gleichgewicht daran, dass die Nadel des Elektrometers dann keinen Ausschlag geben darf. Solche Methoden des Experimentierens sind als »*Null-Methoden*« bekannt.

264. Elektrometer mit trockener Säule. Das Prinzip der Symmetrie, welches bei dem Quadrant-Elektrometer angewendet wird, kam schon früher bei dem Bohnenberger'schen Elektroskop — einem Apparate von bedeutend geringerer Genauigkeit — zur Anwendung. Hier wurde die zu untersuchende Ladung einem einzelnen Goldblatte mitgeteilt, welches symmetrisch zwischen den Polen einer trockenen Säule (Art. 182) hing und dann von einem der beiden Pole angezogen wurde. Fechner änderte den Apparat dahin ab, dass er den + Pol der trockenen Säule mit einem zwischen zwei Metallplatten hängenden Goldblatte verband; dasselbe wurde dann von der am

Digitized by Google

meisten + Platte abgestossen. Die Inkonstanz trockener Säulen als Quellen der Elektrisierung veranlasste Hankel, eine Batterie von sehr vielen kleinen Daniell'schen Elementen zu benutzen.

265. Kapillar-Elektrometer. Das Kapillar-Elektrometer von Lippmann wurde in der von Dewar angegebenen Modifikation in Art. 225 beschrieben.

XXII. VORLESUNG: *Spezifische induktive Kapazität etc.*

266. In der 6. Vorlesung haben wir gesehen, dass die Kapazität einer Leydener Flasche oder eines andern Kondensators von der Grösse der leitenden Belegungen oder Oberflächen, von der Dicke des sie trennenden Glases oder des betreffenden dielektrischen Körpers und von der besondern »*induktiven Kapazität*« des benutzten dielektrischen Körpers abhängig ist. Diesen Gegenstand wollen wir jetzt genauer untersuchen. In Art. 246 wurde festgesetzt, dass die Kapazität eines Konduktors durch die Elektrizitätsmenge gemessen wird, welche erforderlich ist, um sein Potential von Null bis zur Einheit zu erhöhen; oder wenn eine Elektrizitätsmenge Q das Potential des Kondensators von V auf V' erhöht, so ist seine Kapazität

$$C = \frac{Q}{V' - V}.$$

Nun können wir eine Leydener Flasche oder einen andern Kondensator als einen Konduktor betrachten, bei welchem (in Folge der besondern Einrichtung, dass die beiden mit entgegengesetzten Elekrizitäten geladenen Oberflächen einander genähert werden) die leitende Oberfläche mit einer sehr grossen Elektrizitätsmenge geladen werden kann, ohne dass ihr Potential (ob + oder —) dadurch sehr hoch wird. Die Kapazität eines Kondensators kann, wie diejenige eines einfachen Konduktors, durch die Elektrizitätsmenge gemessen werden, welche erforderlich ist, um die Einheit des Potentials zu erzeugen.

Digitized by Google

267. Theorie des sphärischen Luft-Kondensators. Wir wollen annehmen, dass eine Leydener Flasche aus 2 konzentrischen Metallkugeln besteht, von denen die eine innerhalb der andern sich befindet, und dass der Raum zwischen beiden Kugeln mit Luft gefüllt sei. Die innere Kugel A stellt die innere Belegung von Zinnfolie vor, und die äussere Kugel B (Fig. 102) stellt die äussere Belegung vor. Die Radien dieser Kugeln seien bez. r und r'. Nehmen wir an, dass der Kugel A eine Ladung von Q Einheiten mitgeteilt sei, so induziert dieselbe auf der innern Seite von B eine ebenso grosse negative Ladung — Q, und auf die äussere Seite von B wird eine Ladung + Q abgestossen. Letztere wird durch Verbindung mit der »Erde« abgeleitet und braucht nicht weiter berücksichtigt zu werden. Berechnet man das Potential [1]) im Mittelpunkte M nach der im Art. 238 angegebenen Regel, so ergibt sich:

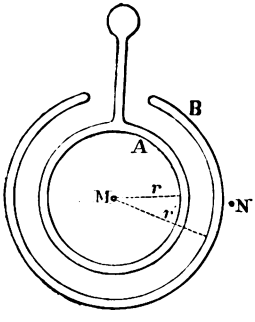

Fig. 102.

$$V_M = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r'}.$$

In einem Punkte N ausserhalb der äussern Kugel und sehr nahe an ihrer Oberfläche ist das Potential dasselbe, als wenn diese beiden Ladungen, + Q und — Q, in M konzentriert wären. Folglich:

$$V_N = \frac{+Q - Q}{r'} = 0.$$

Mithin ist die Potentialdifferenz:

$$V_M - V_N = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r'} = Q\left(\frac{r' - r}{rr'}\right)$$

1) Der Leser muss sich erinnern, dass innerhalb eines geschlossenen Konduktors keine elektrische Kraft vorhanden ist, und dass deshalb das Potential im Mittelpunkte genau dasselbe ist, wie in einem beliebigen andern Punkte innerhalb der Kugel; so dass man sich nicht ganz korrekt ausdrückt, wenn man sagt, der Mittelpunkt M hätte ein Potential.

Digitized by Google

und hieraus folgt: $\frac{Q}{V_M - V_N} = \frac{rr'}{r' - r}$.

Nach dem vorhergehenden Artikel ist aber die Kapazität $C = \frac{Q}{V_M - V_N}$, folglich $C = \frac{rr'}{r' - r}$.

Wir ersehen aus dieser Formel, dass die Kapazität des Kondensators der Grösse der Metallkugeln proportional ist, und, falls die isolierende Schicht sehr dünn ist — d. h. falls r fast ebenso gross wie r' — die Differenz $r' - r$ sehr klein und der Wert des Ausdrucks $\frac{rr'}{r' - r}$ sehr gross wird. Dies beweist den Satz, dass die Kapazität eines Kondensators von der Dicke der dielektrischen Schicht abhängt.

268. Spezifische induktive Kapazität. Cavendish machte zuerst die Entdeckung, dass die Kapazität eines Kondensators nicht bloss von seinen Dimensionen abhängt, sondern auch von der *induktiven Fähigkeit* desjenigen dielektrischen Körpers, welcher sich zwischen den beiden Oberflächen befindet. Haben 2 Kondensatoren (gleichviel von welcher der zu beschreibenden Formen) genau dieselbe Grösse, aber verschiedene dielektrische Körper, der eine z. B. Luft, der zweite irgend einen andern isolierenden Körper, so ergibt sich, dass gleiche Elektrizitätsmengen, welche ihnen mitgeteilt werden, ungleiche Potentialdifferenzen erzeugen; oder mit andern Worten, sie haben dann nicht dieselbe Kapazität. Ist der dielektrische Körper z. B. Schwefel, so ist die Kapazität ungefähr dreimal so gross, denn Schwefel besitzt eine grosse induktive Fähigkeit und leitet den elektrostatischen Einfluss 3mal besser durch sich hindurch, als die Luft. Der Name **spezifische induktive Kapazität** [1]) wurde von Faraday gewählt, um das Verhältniss der Kapazitäten zweier

1) Der Name ist nicht ganz glücklich gewählt — spezifische Induktion würde besser gewesen sein, und ist in Bezug auf dielektrische Körper der analoge Ausdruck zu »spezifischer Leitung« der Konduktoren. Der Ausdruck dielektrische Kapazität wird ebenfalls von einigen neuern Schriftstellern gebraucht.

Digitized by Google

gleich grossen Kondensatoren zu bezeichnen, von denen der eine ein Luftkondensator, der andere mit dem betreffenden dielektrischen Körper gefüllt war. Die spezifische induktive Kapazität trockener Luft bei einer Temperatur von 0° C. und einem Drucke von 76 Zentimetern Quecksilber wird als Einheit genommen.

Im Jahre 1775 wurde von Cavendish die spezifische induktive Kapazität des Glases, des Wachses und anderer Körper gemessen, indem er sich Kondensatoren herstellte, bei welchen die betreffenden Substanzen zwischen 2 kreisförmigen Metallplatten benutzt wurden, und indem er die Kapazität dieser Kondensatoren mit derjenigen eines Luftkondensators (ähnlich Fig. 30) und mit andern Kondensatoren, welche er »Versuchsplatten« nannte, verglich. Er versuchte sogar, die Kapazitäten dieser Versuchsplatten mit derjenigen einer Kugel von 12½ Zoll Durchmesser zu vergleichen, welche er in der Mitte eines Zimmers aufgehängt hatte.

269. Faraday's Versuche. Im Jahre 1837 entdeckte Faraday, unabhängig von Cavendish, dessen bis dahin noch nicht veröffentlichte Untersuchungen er nicht kannte, die spezifische induktive Kapazität und bestimmte ihren Wert für verschiedene Körper, indem er zu diesem Zwecke zwei Kondensatoren von der in Fig. 103 veranschaulichten Gestalt benutzte. Jeder derselben bestand aus einer Messingkugel A, welche rings von einer hohlen Messingkugel B umgeben, und durch einen langen Schellackstab von ihr isoliert war, durch welche ein in eine Kugel *a* endigender Draht führte. Die äussere Kugel bestand aus zwei Teilen, welche von einander getrennt werden konnten, um den hohlen Raum mit irgend einem gewünschten Material zu füllen: der Versuch bestand dann

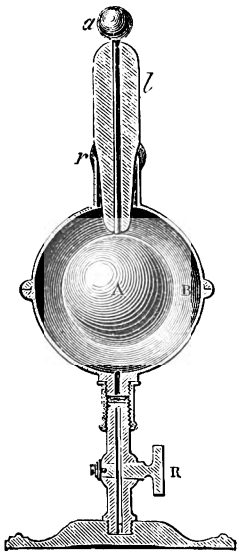

Fig. 103.

Digitized by Google

darin, ihre Kapazitäten zu vergleichen, wenn die eine Kugel mit dem zu untersuchenden Körper, die andere nur mit trockener Luft gefüllt war. Die Methode des Experimentierens war einfach. Einer der Kondensatoren wurde mit Elektrizität geladen. Es wurden nun die beiden innern Belegungen der beiden Kondensatoren mit einander in metallische Berührung gesetzt und ebenso die äussern Belegungen mit einander verbunden und dadurch bewirkt, dass die mitgeteilte Ladung sich jetzt auf beide Kondensatoren verteilte. Wären ihre Kapazitäten nun gleich, so würden sie die Ladung gleichmässig unter sich verteilen, und das Potential würde nach der Berührung gerade halb so gross sein, wie es in dem geladenen Kondensator vor der Berührung gewesen war. Wäre die Kapazität des einen grösser, als die des andern, so würde das resultierende Potential nicht genau die Hälfte des Anfangspotentials betragen, weil sie die Ladung nicht gleichmässig unter sich verteilen würden, sondern im Verhältnis zu ihren Kapazitäten. Die Potentiale der Ladungen wurden vor und nach der Berührung mittelst einer Torsionswaage gemessen [1]). Faradays Resultate waren folgende: Die spezifischen induktiven Kapazitäten sind für Schwefel 2,26; für Schellack 2,0; für Glas 1,76 oder mehr.

270. Neuere Untersuchungen. Seit 1870 haben sich unsere Kenntnisse über diesen Gegenstand bedeutend vervollkommnet. Gibson und Barclay bestimmten die induktive Kapazität des Paraffin, indem sie die Kapazität eines Luftkondensators mit einem solchen von Paraffin mit Hilfe eines Schlittenkondensators und eines geteilten Kondensators, den sie »Platy-

---

1) Der Wert der spezifischen induktiven Kapazität K liess sich dann auf folgende Weise berechnen:

$$Q = VC = V'C + V'Ck$$

(wo C die Kapazität des ersten Apparates und V sein Potential bedeutet; V' aber das Potential nach der Verbindung mit dem zweiten Apparate, dessen Kapazität $= Ck$); folglich

$$V = V'(1 + k) \text{ und } k = \frac{V - V'}{V'}.$$

Digitized by Google

meter« nannten, verglichen, wobei sie ein Quadrantelektrometer als empfindliches Elektroskop benutzten, um die Kapazität der Kondensatoren genau gleich zu machen. Wüllner, Boltzmann und Andere haben ebenfalls die induktiven Kapazitäten fester Körper nach verschiedenen Methoden untersucht. Hopkinson hat diejenige der verschiedenen Glassorten untersucht, indem er eine konstante Batterie benutzte, um die erforderlichen Potentialdifferenzen zu erzeugen, sowie einen mit einem Schutzringe versehenen Kondensator. Dieser Schutzring hatte einen ähnlichen Zweck wie derjenige der absoluten Elektrometer. Gordon hat ganz kürzlich zahlreiche Beobachtungen angestellt, wobei er einen empfindlichen Apparat verwendete, welcher unter dem Namen einer statischen »Induktionswaage« bekannt ist und aus einem zusammengesetzten Kondensator besteht, der in Verbindung mit einem Quadrantelektrometer so eingerichtet ist, dass, wenn die Kapazitäten der einzelnen Teile gleich gemacht werden, keine Ablenkung in dem Elektrometer stattfindet, gleichviel wie stark oder welcher Art die im Augenblicke angewendete Elektrisierung ist. Wird dieser Apparat in Verbindung mit einer Induktionsrolle (Fig. 148) und einem schnellen Kommutator angewendet, so kann man mit demselben die induktive Kapazität messen, selbst wenn die Dauer der Ladung nur ganz kurz ist, indem die Elektrisierung 12000 mal pro Sekunde umgekehrt wird. Solcher Apparat überwindet daher eine grosse Schwierigkeit, der man bei diesen Messungen begegnet, nämlich die Schwierigkeit, welche aus der offenbaren Absorption eines Teiles der Ladung durch den dielektrischen Körper (vgl. Art. 53) entsteht; die Kapazität des Körpers ist bei langsamer Messung verschieden von seiner »momentanen wahren Kapazität.« Von dieser elektrischen Absorption ist ausführlicher in Art. 272 die Rede. Die Grösse der absorbierten Ladung hängt, wie sich herausgestellt hat, von der Zeit ab, während welcher die Ladung angesammelt wurde. Aus diesem Grunde weichen die Werte, die verschiedene Beobachter für die induktive Kapazität der einzelnen Körper gefunden haben, bedeutend von

Digitized by Google

einander ab, besonders wo es sich um weniger vollkommene Isolatoren handelt. Die folgende Tabelle enthält eine Uebersicht der Beobachtungen Gordon's:

Luft	1,00
Glas	3,013 bis 3,258
Ebonit	2,284
Guttapercha	2,462
Kautschuck	2,220 bis 2,497
Paraffin (fest) . . .	1,9936
Schellack	2,74
Schwefel	2,58.

Gordon's Werte würden wahrscheinlich zuverlässiger sein, wenn die Platten der Induktionswaage mit Schutzringen (Art. 248) versehen gewesen wären. Hopkinson, dessen Methode eine »langsame« war, fand für Glas viel höhere induktive Kapazitäten, welche zwischen den Werten 6,5 und 10,1 lagen, und zwar hatten die dichtern Sorten höhere Kapazitäten. Rowland hat kürzlich die induktive Kapazität von Quarzplatten untersucht, welche aus einem homogenen Krystall gearbeitet sind, und fand, dass dieselben vollkommen frei von elektrischer Absorption sind. Cavendish machte die Beobachtung, dass die scheinbare Kapazität des Glases bedeutend grösser bei denjenigen Temperaturen wurde, bei denen dasselbe anfängt, die Elektrizität zu leiten. Boltzmann veröffentlichte seine Untersuchungen über den Fall zweier krystallinischer Körper, des Isländischen Spats und des Schwefels, deren induktive Kapazität in verschiedenen Richtungen eine andere ist, entsprechend ihrer Lage zu den Axen des Krystalls.

271. Spezifische induktive Kapazität von Flüssigkeiten und Gasen. Auch die induktive Kapazität von Flüssigkeiten hat spezifische Werte. Die folgende Tabelle enthält einige Angaben von Silow und Gordon:

Terpentin	2,16
Petroleum	2,03 bis 2,07
Schwefelkohlenstoff .	1,81.

Digitized by Google

Faraday untersuchte mit Hilfe seines Apparates (Fig. 103) die induktive Kapazität verschiedener Gase. Er füllte den einen Kondensator mit Luft, den andern mit dem zu untersuchenden Gase, welches er durch die Röhre unterhalb der Kugel einströmen liess, nachdem er letztere mit einer Luftpumpe luftleer gemacht hatte. Die Methode war jedoch zu ungenau, als dass er einen Unterschied zwischen ihnen hätte entdecken können, obgleich er viele Versuche mit verschiedenen Gasen bei verschiedenen Temperaturen und bei wechselndem Druck anstellte. In der neuern Zeit haben Boltzmann, und unabhängig von ihm, Ayrton und Perry, die spezifischen induktiven Kapazitäten verschiedener Gase nach sehr genauen Methoden bestimmt, und ihre Resultate stimmen sehr hübsch überein.

	Boltzmann.	Ayrton und Perry.
Luft	1	1
Luftleerer Raum	0,999410	0,9985
Wasserstoff	0,999674	0,9998
Kohlensäure	1,000356	1,0008
Kohlenwasserstoffgas	1,000722	
Schweflige Säure		1,0037

272. Mechanische Wirkungen der dielektrischen Spannung. Der Umstand, dass verschiedene isolierende Körper spezifische induktive Fähigkeit haben, ist eine ausreichende Widerlegung der Ansicht, dass die Induktion nichts weiter als eine »Wirkung in die Ferne« sei, denn es ist klar, dass das dielektrische Medium selbst bei der Verbreitung der Induktion in Betracht kommt, und dass einige Media besser als andere die Induktion durch sich hindurch wirken lassen. Das Vorhandensein eines Residuums (Art. 53) lässt sich entweder durch die Annahme erklären, dass der dielektrische Körper aus heterogenen Teilchen besteht, welche ungleiche Leitungsfähigkeit haben, wie Maxwell angenommen hat, oder durch die Hypothese, dass die Moleküle wirklich einer Spannung unterworfen werden, von welcher sie sich nicht sogleich wieder erholen,

Digitized by Google

besonders wenn die Spannung längere Zeit vorhielt. Kohlrausch und andere haben auf die Analogie zwischen dieser Erscheinung und derjenigen der »elastischen Nachwirkung« fester Körper hingewiesen, welche einer biegenden oder tordierenden Kraft unterworfen worden waren. Ein Glasfaden z. B., der durch eine gewisse Kraft tordiert wird, kehrt, sich selbst überlassen, fast in seine ursprüngliche Lage wieder zurück, eine geringe dauernde Verschiebung bleibt zurück, von welcher er sich jedoch langsam erholt, wobei das Verhältnis der Rückkehr in die frühere Lage von der Grösse und Dauer der ursprünglichen tordierenden Kraft abhängt. Hopkinson hat gezeigt, dass sich mehrere Residua über einander ansammeln lassen, und sogar Ladungen entgegengesetzter Art, welche allmählich »entweichen«, wenn der gespannte Körper allmählich in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt. Perry und Ayrton haben auch diesen Gegenstand untersucht und haben gezeigt, dass bei den Polarisationsladungen der Voltameter eine ähnliche Nachwirkung eintritt [1]). Luftkondensatoren zeigen keine Residua.

Wird ein Kondensator entladen, so vernimmt man oft einen Ton. Dies bemerkte W. Thomson bei Luftkondensatoren; und Varley konstruierte sogar ein Telephon, bei welchem durch die schnelle Ladung und Entladung eines Kondensators distinkte Töne erzeugt wurden.

Was die Natur der molekularen oder mechanischen Vorgänge in dem dielektrischen Körper anbetrifft, wenn derselbe auf diese Weise der Spannung der elektrostatischen Induktion ausgesetzt wird, so ist hierüber nichts bekannt. Ein wichtiger Versuch Faraday's ist von grosser Bedeutung, da derselbe zeigt, dass die Induktion eine, wie er sich ausdrückte, »Wirkung be-

1) Es scheint hiernach, dass Maxwell's Annahme der heterogenen Struktur, in Folge welcher eine residuale Elektrisierung an der Grenzschicht der Teilchen stattfindet, deren elektrische Leitungsfähigkeit verschieden ist, die wahre Erklärung des Residuums ist. Die Erscheinung der elastischen Nachwirkung ist vielleicht selbst eine Folge der heterogenen Struktur.

Digitized by Google

nachbarter Atome« ist. Ein gläserner Trog (Fig. 104) wird z. T. mit Terpentinöl angefüllt, welchem einige in kleine Stücke geschnittene Fäden von trokkener Seide zugesetzt werden. In die Flüssigkeit führen zwei Drähte, deren einer mit der Erde in Verbindung steht, während man den andern mit dem Kollektor einer Elektrisiermaschine verbindet. Die Seidenstückchen kommen von allen Seiten der Flüssigkeit und bilden eine von Draht zu Draht führende Kette. Berührt man sie mit einem Glasstabe, so leisten sie Widerstand, wenn sie zur Seite gestossen werden, dagegen fahren sie auf einmal auseinander, wenn die Zufuhr der Elektrizität aufhört. Faraday betrachtete dies als ein typisches Bild der innern Wirkungen, welche im Falle der Induktion in einem dielektrischen Körper stattfinden, dessen Teilchen, wie er annahm, »polarisiert« würden, d. h. in bestimmte Lagen gelangten, und von denen jedes ein + und ein — Ende hätte. Der Leser wird daher eine offenbare Analogie zwischen dem Zustande der Teilchen eines dielektrischen Körpers finden, an welchem eine elektrostatische Induktion stattfindet, und den Molekülen eines Stück Eisens oder Stahls, welches der magnetischen Induktion unterworfen wird.

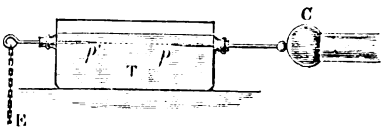

Fig. 104.

Siemens hat gezeigt, dass das Glas einer Leydener Flasche merklich erwärmt wird, wenn dieselbe zu wiederholten malen und schnell hinter einander geladen und entladen wird. Hieraus folgt offenbar, dass die Aenderungen der dielektrischen Spannung von einer molekularen Bewegung begleitet sind.

273. Elektrische Expansion. Fontana machte die Beobachtung, dass das innere Volumen einer Leydener Flasche sich vergrösserte, wenn dieselbe geladen wurde. Volta suchte dies durch die Annahme zu erklären, dass die Anziehung zwischen den beiden geladenen Oberflächen das Glas zusammendrückte, so dass dadurch eine seitliche Ausdehnung veranlasst

Digitized by Google

würde. Auf denselben Gedanken war Priestley schon früher gekommen. Duter zeigte, dass die Grösse der scheinbaren Expansion der Dicke des Glases umgekehrt proportional ist und sich wie das Quadrat der Potentialdifferenz ändert. Quincke hat neuerdings gezeigt, dass, während Glas und einige andere Isolatoren elektrische Expansion zeigen, Harze und ölige Körper unter dem Einflusse der elektrostatischen Spannung eine deutliche Zusammenziehung zeigen. Mit diesen Eigenschaften bringt er die Erzeugung optischer Spannung und der von Kerr entdeckten doppelten Refraktion in Verbindung. (Vergl. die Vorlesung über Elektro-Optik, Art. 386.)

274. **Unterseeische Kabel als Kondensatoren.** Ein unterseeisches Telegraphen-Kabel kann als Kondensator wirken, indem der Ocean die äussere Belegung, der innere Draht die innere Belegung bildet, während die isolierenden Schichten von Guttapercha dem Glase der Leydener Flasche entsprechen. Wenn das eine Ende eines untergetauchten Kabels z. B. mit dem + Pole einer kräftigen Batterie verbunden wird, so strömt + Elektrizität in dasselbe. Bevor man am andern Ende ein Signal erhalten kann, muss eine genügende Menge Elektrizität einströmen, um das Kabel bis zu einem beträchtlichen Potential zu laden, eine Operation, welche im Falle langer Kabel mehrere Sekunden erfordern kann. Faraday sagte voraus, dass diese Verzögerung stattfinden würde. Thatsächlich ist dies für schnelles Telegraphieren durch die Atlantischen Kabel und andere ein ernstliches Hindernis. Professor Fleeming Zenkin gab folgenden experimentellen Beweis dieses Umstandes. Man rolle eine Meile des isolierten Kabel-Drahtes in einer Tonne mit Wasser zusammen (Fig. 105), indem man das eine Ende N isoliert. Das andere Ende wird durch ein Galvanometer mit grossem Widerstande, G, mit dem + Pole einer grossen Batterie verbunden, deren — Pol durch einen Draht mit dem Wasser in der Tonne in Verbindung gebracht wird. Sowie dies geschieht, zeigt die Nadel des Galvanometers eine kräftige Ablenkung, indem + Elektrizität durch dasselbe in das Innere

Digitized by Google

des Kabels strömt, und eine — Ladung sich an der Aussenseite des letztern ansammelt, dort wo das Wasser das Gutta-

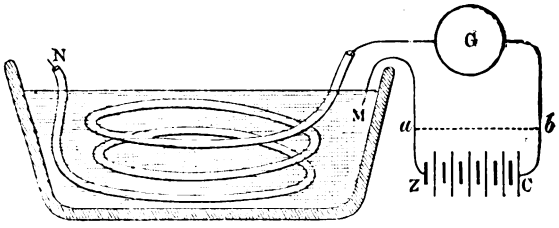

Fig. 105.

percha berührt. Das Einströmen der Elektrizität dauert vielleicht, obgleich in abnehmendem Verhältnis, eine Stunde, bevor das Kabel vollständig geladen ist. Jetzt entfernt man die Batterie, und verbindet dafür *a* und *b* durch einen Draht; die Ladung in dem Kabel strömt dann durch das Galvanometer, welches eine entgegengesetzte Ablenkung anzeigt, und das Residuum entladet sich noch lange Zeit hindurch.

Da die Schnelligkeit des Telegraphierens und damit die ökonomische Verwertung eines Kabels von seiner »Kapazität« als Kondensator abhängt [1]), und da seine Kapazität von der spezifischen induktiven Fähigkeit des benutzten isolierenden Körpers abhängt, so zieht man die Hooper'sche Mischung, welche billig ist und eine Induktionskapazität von nur 1,7 hat, dem Guttapercha vor, welches teuer ist und eine spezifische Induktionskapazität von 2,46 besitzt.

275. Anwendung der Kondensatoren. Um diese Verzögerung zu vermeiden und um die Geschwindigkeit des Telegraphierens durch Kabel zu vergrössern, hat man verschiedene Methoden in Anwendung gebracht. Man verwendet sehr empfindliche Annahme-Instrumente, welche bloss einen schwachen Strom erfordern; denn bei den schwächern Batterieen ist die

1) Die Kapazität des »direkten« Atlantischen Kabels von Ballinskelligs (Irland) nach Nova Scotia beträgt 992 Microfarad.

Digitized by Google

wirkliche, dem Kabel mitgeteilte Ladung geringer. In vielen Fällen verwendet man einen Schlüssel, welcher unmittelbar nach jedem Signal eine Ladung von entgegengesetztem Zeichen in das Kabel sendet, um die zurückgebliebene Ladung gewissermassen auszutreiben. Beim Doppel-Telegraphieren (Vorl. 39) ist der Widerstand und die elektrostatische Kapazität des Kabels dadurch zu überwinden, dass man ihnen durch ein »künstliches Kabel« das Gegengewicht hält, welches aus einem Drahte von gleichem Widerstande und einem Kondensator von gleicher Kapazität besteht. Die Herren Muirhead konstruierten zur Verdoppelung des Atlantischen Kabels einen Kondensator, welcher 100,000 Quadratfuss Zinnfolie enthielt. Solche Kondensatoren wendet man auch gelegentlich bei Telegraphenlinien mit einfachem Betriebe an, um die Erdströme zu vermeiden. Sie werden in der Weise angefertigt, dass man Platten von Zinnfolie zwischen solche von Glimmer oder paraffiniertem Papier stellt und die auf einander folgenden Folieplatten verbindet. Kleine Kondensatoren ähnlicher Konstruktion gebraucht man in Verbindung mit Induktionsrollen (Fig. 148).

276. Praktische Einheit der Kapazität. Die Elektriker nehmen eine *Einheit der Kapazität* an, welche sie ein **Farad** nennen, und die sich auf das System der elektromagnetischen Einheit gründet. Ein Kondensator von einem Farad Kapazität würde durch eine Ladung eines elektrischen Coulomb auf ein Potential von einem Volt gebracht werden [1]). In der Praxis würde die Konstruktion eines solchen Kondensators zu grosse Schwierigkeiten haben. Daher hat man als *praktische Einheit* der Kapazität das **Mikrofarad** gewählt, welches der millionste Teil eines Farad ist; eine Kapazität, welche ungefähr derjenigen eines Atlantischen Kabels von 3 Meilen Länge entspricht. Man hat Mikrofarad-Kondensatoren angefertigt, welche mehr als 22000 Quadrat-Zentimeter Zinnfolie enthalten. Ihre gebräuchliche Form zeigt Fig. 106, welche einen $\frac{1}{3}$ Mikrofarad-Kondensator darstellt. Die beiden Messingstücke auf dem Ebonitdeckel werden bezüglich mit den beiden Reihen

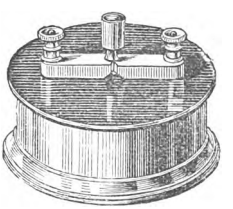

Fig. 106.

1) Vergl. die Anmerkung über Elektromagnetische Einheiten, Art. 321.

Digitized by Google

der abwechselnden Zinnfolieplatten verbunden. Der Zapfen zwischen denselben hat den Zweck, den Kondensator im nicht geladenen Zustande zu erhalten, so lange derselbe nicht im Gebrauch ist.

Im Art. 362 sind Methoden angegeben, wie man die Kapazität eines Kondensators messen kann.

277. Formeln für Kapazitäten von Konduktoren und Kondensatoren. Die folgenden Formeln geben die Kapazität von Kondensatoren aller gewöhnlichen Formen, in elektrostatischen Einheiten:

Kugel: (Radius $= r$. Vergl. Art. 247.)

$$C = r.$$

Zwei konzentrische Kugeln: (Radien r und r': spezifische induktive Kapazität des dielektrischen Körpers $= k$).

$$C = k \frac{rr'}{r' - r}$$

Cylinder: (Länge $= l$, Radius $= r$)

$$C = \frac{l}{2 \log \text{nat} \cdot \frac{l}{r}}$$

Zwei konzentrische Cylinder: (Länge $= l$, spezifische induktive Kapazität des dielektrischen Körpers $= k$, innerer Radius $= r$, äusserer Radius $= r'$)

$$C = k \frac{l}{2 \log \text{nat} \cdot \frac{r'}{r}}$$

Kreisförmige Scheibe: (Radius $= r$; die Dicke verschwindend)

$$C = \frac{2r}{\pi}$$

Zwei kreisförmige Scheiben: (wie beim Luftkondensator, Art. 48; Radien $= r$, Oberfläche $= S$, Dicke des dielektrischen Körpers $= b$, seine spezifische induktive Kapazität $= k$)

$$C = k \frac{r^2}{4b}$$

oder $$C = k \frac{S}{4\pi b}$$

Digitized by Google

(Die letztere Formel passt für 2 beliebige parallele Scheiben, deren Oberfläche = S, gleichviel ob sie kreisförmig sind oder nicht, vorausgesetzt, dass sie im Vergleich zu ihrem Abstande *b* sehr gross sind.)

278. Energie der Entladung einer Leydener Flasche oder eines Kondensators. Aus der im Art. 237 angegebenen Definition des Potentials folgt, dass eine Arbeit von V Erg verrichtet wird, wenn man eine + elektrische Einheit auf das Potential V bringt. Dies setzt jedoch voraus, dass das Gesamtpotential V dadurch nicht erhöht wird; unter dieser Voraussetzung würde die verrichtete Arbeit QV betragen, wenn Q Einheiten auf das Potential V gebracht würden. Ist jedoch das Potential von anfang an = o, und wird dasselbe durch die Ladung Q auf den Wert V gebracht, so ist das Durchschnittspotential während des Versuchs nur $\frac{1}{2}$ V; folglich ist die gesamte Arbeit, welche verrichtet wird, wenn die Ladung Q vom Potential o auf das Potential V gebracht wird, = $\frac{1}{2}$ QV *Erg.* Nach dem Prinzipe von der Erhaltung der Energie ist nun die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man eine Flasche oder einen Kondensator mit Elektrizität ladet, gleich derjenigen Arbeit, welche von jener elektrischen Menge beim Entladen der Flasche verrichtet werden könnte. Daher repräsentiert der Ausdruck $\frac{1}{2}$ QV auch die Energie der Entladung, wobei V die Potentialdifferenz zwischen den beiden Belegungen bedeutet.

Da $Q = VC$, so folgt, dass wir $\frac{1}{2}$ QV in der Form $\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$ schreiben können; d. h. wenn ein Kondensator von der Kapazität C durch eine ihm mitgeteilte Elektrizitätsmenge Q geladen wird, so ist die Energie der Ladung dem Quadrate der Menge direkt, und der Kapazität des Kondensators umgekehrt proportional.

Wenn zwei gleich grosse Leydener Flaschen auf dasselbe Potential geladen, und dann ihre innern und äussern Belegungen bezüglich mit einander verbunden werden, so ist ihre vereinigte

Digitized by Google

Ladung gleich der einer Flasche von derselben Dicke und doppelt so grosser Oberfläche.

Wird auf ähnliche Weise eine geladene Leydener Flasche mit einer nicht geladenen Flasche von gleicher Kapazität in Verbindung gesetzt, so verteilt sich die Ladung gleichmässig auf beide Flaschen, und der Uebergang der Elektrizität von der einen zur andern wird dadurch bewiesen, dass man einen Funken erhält, wenn die resp. Belegungen mit einander verbunden werden. Hier geht jedoch die Hälfte der Energie der Ladung bei der Verteilung derselben verloren, denn jede Flasche hat nur noch die Ladung $\frac{1}{2}$ Q und das Potential $\frac{1}{2}$ V; daher ist die Energie der Ladung jeder Flasche das halbe Produkt aus Ladung und Potential und also nur $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Energie. Der bei der Verteilung der Ladung überspringende Funke ist in der That ein Beweis für den Verlust an Energie; derselbe ist ungefähr halb so kräftig wie in dem Falle, wo die erste Flasche einfach entladen worden wäre, und er ist ungefähr doppelt so kräftig, wie diejenigen kleinen Funken, welche man schliesslich bei der Entladung jeder einzelnen Flasche erhält, nachdem die Ladung sich auf beide verteilt hat.

Die Energie einer Ladung der Flasche zeigt sich, wie oben festgestellt wurde, in Gestalt eines Funkens bei der Entladung; der Schall, das Licht und die Wärme, welche erzeugt werden, sind die Aequivalente der angesammelten Energie. Geht die Entladung langsam durch einen langen, dünnen Draht von grossem Widerstande vor sich, so ist der Funke schwach, wogegen der Draht beträchtlich erwärmt wird. Eine feuchte Schnur veranlasst als mässiger Konduktor eine langsame, fast ohne Knall vor sich gehende Entladung; hier hat die elektrolytische Leitung der Feuchtigkeit wahrscheinlich eine Wirkung im Gefolge, welche derjenigen der Sekundärbatterieen (Vorl. 38) gleichkommt, indem sie die Dauer der Entladung zu verlängern strebt.

279. Ladung von Flaschen, welche in Kaskaden angeordnet sind. Franklin kam auf den Gedanken, eine

Digitized by Google

Reihe von Flaschen derart anzuordnen, dass die äussere Belegung der einen mit der innern der nächsten in Verbindung stand, während die äussere Belegung der letzten Flasche mit der Erde verbunden wurde. Der Zweck dieser Anordnung war, die zweite Flasche mit der Elektrizität zu laden, welche von der äussern Belegung der ersten abgestossen wird, die dritte Flasche mit der von der zweiten abgestossenen u. s. w. Diese Anordnung in »Kaskaden« ist jedoch von keinem Vorteil, da die in der ganzen Reihe angesammelte Ladung nur so gross ist, wie die einer einzigen Flasche. Denn wird die innere Belegung der ersten Flasche auf das Potential V gebracht, so ist, da die äussere Belegung der letzten Flasche mit der Erde in Verbindung steht und also das Potential o hat, die Potentialdifferenz zwischen der äussern und innern Belegung einer jeden Flasche nur $\frac{1}{n}$ V, wenn n die Anzahl der Flaschen bedeutet. Und da die Ladung in jeder Flasche gleich ist ihrer Kapazität C, multipliziert mit ihrem Potential, so ist die Ladung in jeder Flasche bloss $\frac{1}{n}$ CV, und in allen n Flaschen die Gesamtladung $n \cdot \frac{1}{n}$ CV = CV, oder gleich der Ladung einer Flasche von der Kapazität C, erhoben auf das nämliche Potential V.

XXIII. VORLESUNG: *Erscheinungen der Entladung.*

280. Ein elektrisierter Konduktor kann auf mindestens drei verschiedene Arten entladen werden, welche von dem Medium, durch welches die Entladung stattfindet, abhängen und sich nach den die Entladung begleitenden Umständen richten.

281. Funken-Entladung. In der vorhergehenden Vorlesung haben wir gezeigt, dass Induktion durch ein nicht leitendes Medium stets von einer mechanischen Spannung des Mediums begleitet ist. Wenn diese Spannung sehr gross ist, so gibt das nicht leitende Medium plötzlich nach und ein *Funke*

Digitized by Google

geht durch dasselbe hindurch. Eine derartige Entladung heisst eine **„Funken"-Entladung.**

Ein sehr einfacher Versuch macht die Sache bei sorgfältiger Betrachtung klar. Angenommen, wir hätten eine mit + Elektrizität geladene Metallkugel mittelst einer seidenen Schnur über einer auf dem Boden befindlichen Metallplatte aufgehängt. Lassen wir die aufgehängte Kugel nach unten herab, so springt von derselben ein Funke nach der Platte über, wenn beide einander sehr nahe gekommen sind, und die Kugel hat alsdann, wie sich herausstellt, ihre ganze vorige Ladung verloren. Dieselbe war mit einer gewissen Elektrizitätsmenge geladen, und hatte, falls sie sich ausserhalb des Bereichs anderer Konduktoren befand, eine bestimmte Kapazität (numerisch gleich ihrem in Zentimetern ausgedrückten Radius); folglich hatte sie ein bestimmtes Potential $\left(\text{nämlich } \frac{Q}{C}\right)$ und die Ladung war in einer bestimmten Oberflächendichte über sie verteilt. Die auf der Erde befindliche Platte hatte während der ganzen Zeit das Potential o. Wird jedoch die aufgehängte Kugel hinabgelassen, so ändert sich der bisherige Zustand. In der Nähe der + Ladung der Kugel würde das Potential [1]) der Platte steigen, wenn nicht durch die Wirkung der Induktion eine gerade hinreichende Menge negativer Elektrizität auf der Platte erschiene, welche ihr Potential gleich dem der Erde erhält. Die auf der Platte induzierte — Elektrizität zieht die + Elektrizität der Kugel nach unten und ändert die elektrische Verteilung auf derselben, so dass die Oberflächendichte auf der untern Seite grösser, auf der obern geringer wird. Die Kapazität der Kugel wird erhöht und ihr Potential nimmt in Folge dessen entsprechend ab. Die Luftschicht zwischen der Kugel und der Platte wirkt wie das Glas einer Leydener Flasche. Je tiefer die Kugel herabgelassen

1) Der Leser muss sich erinnern, dass nach der Definition des Potentials in Art. 237, das Potential in einem Punkte die Summe aller einzelnen Elektrizitätsmengen in der Nachbarschaft dieses Punktes ist, jede Menge durch ihren Abstand von dem Punkte dividiert.

Digitized by Google

wird, desto stärker häufen sich die entgegengesetzen Elektrizitäten auf beiden Seiten der Luftschicht an und desto grösser wird die Spannung der Schicht, bis die Grenze der dielektrischen Stärke erreicht ist; die Luft gibt plötzlich nach und der Funke bricht sich einen Weg hindurch. Je grösser die Potentialdifferenz der beiden Körper ist, um so dicker ist die Luftschicht, die auf diese Weise durchbohrt werden kann, und um so länger ist der Funke.

282. Entladung durch Leitung. Wenn die Entladung durch einen kontinuierlichen *Strom* stattfindet, wie z. B. in dem Falle, wo die Elektrizität durch einen dünnen Draht von dem Kollektor einer Maschine nach dem Reibzeuge zurückfliesst, oder von dem + Pole einer Batterie nach dem — Pole, so nennt man diesen Vorgang eine „**Entladung durch Leitung**". Die Gesetze derselben finden sich in der 29. und 30. Vorlesung.

283. Konvektive Entladung. Es gibt noch eine dritte Art der Entladung, welche sich von den beiden bereits erwähnten unterscheidet, und besonders dann eintritt, wenn Elektrizität von hohem Potential sich an einem mit einer Spitze versehenen Konduktor entladet, indem sie sich dort in so grosser Dichte anhäuft, dass sie die benachbarten Luftmoleküle elektrisiert; diese Moleküle werden dann abgestossen und führen einen Teil der Ladung mit sich fort. Solche *konvektiven Entladungen* finden sowohl in Gasen als auch in Flüssigkeiten statt, lassen sich jedoch am besten in der Luft und andern Gasen bei geringem Drucke beobachten, wie z. B. in Röhren, welche man durch eine Luftpumpe luftleer gemacht hat.

Die Entladung einer Elektrizitätsmenge auf eine der angegebenen Weisen ist stets von einer Umwandlung ihrer Energie in Energie irgend welcher anderen Art begleitet — indem Schall, Licht, Wärme, chemische Wirkungen und andere Erscheinungen hervorgebracht werden. Diese Wirkungen sind einzeln zu untersuchen.

284. Mechanische Wirkungen. Die hauptsächlichste mechanische Wirkung der Funken-Entladung ist das Zertrüm-

Digitized by Google

mern und Durchbohren von Glas und andern Isolatoren. Die dielektrische Stärke des Glases ist allerdings viel grösser als die der Luft, aber nicht unendlich gross. Eine $7\frac{1}{2}$ Zentimeter dicke Glasplatte wurde durch die Entladung einer kräftigen Induktionsrolle durchbohrt. Das sogenannte »zähe« Glas hat eine grössere dielektrische Stärke, als das gewöhnliche Glas und ist schwieriger zu durchbohren. Eine Glasscheibe lässt sich ohne Weiteres durch einen Funken von einer Leydener Flasche oder einer Batterie solcher Flaschen durchbohren, wenn man folgende Vorsichtsmassregeln beobachtet: — Man lege das zu durchbohrende Glas auf einen Block von Glas oder Harz, durch welchen ein Draht geführt wird, dessen eines Ende mit der äussern Belegung der Flasche in Verbindung steht, während das andere Ende gerade an der Oberfläche abgeschnitten ist. Auf der obern Fläche der zu durchbohrenden Glasscheibe steht senkrecht zu ihr ein zweiter Draht, dessen Ende sich genau dem untern Drahte gegenüber befindet, während das andere Ende dieses Drahtes mit einem Metallknopfe versehen ist, welcher den Funken vom Knopfe der Flasche oder des Ausladers empfängt. Um eine gute Isolierung zu sichern, giesst man einige Tropfen Paraffinöl oder Olivenöl auf diejenige Stelle des Glases, wo der Draht dasselbe berührt. Ein Stück trockenes Holz wird bei gleicher Anordnung von einem kräftigen Funken zersplittert.

Wird ein Funke durch eine fest verkorkte, mit Wasser angefüllte Glasröhre geführt, so wird letztere durch die plötzliche Ausdehnung der Flüssigkeit in kleine zugespitzte Bruchstücke zertrümmert.

Die mechanische Wirkung der Büschelentladung an Spitzen ist in Art. 43 erwähnt und die mechanischen Wirkungen eines elektrischen Stromes wurden in der 19. Vorlesung beschrieben.

285. Der Lullin'sche Versuch. Wenn ein Kartenblatt von einem Funken zwischen 2 Metallspitzen durchbohrt wird, so beobachtet man zwei merkwürdige Erscheinungen. *Erstens* wird auf jeder Seite ein kleiner Rand aufgeworfen, als wenn

Digitized by Google

das Loch von der Mitte aus auf beiden Seiten nach aussen gebohrt worden wäre. *Zweitens* ergibt sich, dass, wenn die beiden Spitzen nicht genau einander gegenüber stehen, das Loch dem *negativen* Pole näher ist. Wird jedoch der Versuch in einem luftleeren Raume angestellt, so findet keine solche Verschiebung des Loches statt; dasselbe befindet sich dann genau in der Mitte.

286. Chemische Wirkungen. Die von elektrischen Strömen erzeugten chemischen Wirkungen sind in der 14. und 18. Vorlesung beschrieben worden. Aehnliche Wirkungen lassen sich durch den elektrischen Funken und durch die ruhige Glühentladung (Art. 290) erzeugen. In der That zeigte Faraday, dass alle Arten der Elektrizität verschiedener Quellen dieselben chemischen Wirkungen zur Folge hatten, und er machte diesen Umstand als einen Beweis für die wesentliche Identität der auf verschiedene Weise erzeugten Elektrizität geltend. Wenn man einige Funken von einer Elektrisiermaschine auf einem Blatt weissen Löschpapiers auffängt, welches mit einer Lösung Jodkalium getränkt ist, so bemerkt man braune Flecken an der Stelle, wo der Funke eine chemische Zersetzung bewirkt und das Jod ausgeschieden hat.

Wird eine Reihe von Funken durch feuchte Luft in einem Gefässe gesandt, so ergibt sich, dass die Luft die Eigenschaft erhalten hat, blaues Lackmuspapier rot zu färben. Dies ist, wie Cavendish zeigte, eine Folge der vorhandenen Salpetersäure, welche durch die chemische Verbindung des Stickstoffs und des Sauerstoffs der Luft erzeugt wird. Der Versuch gelingt am besten, wenn man den Funkenstrom einer kleinen Induktionsrolle (Fig. 148) durch ein Gefäss gehen lässt, in welchem die Luft stärker komprimiert ist, als dies bei gewöhnlichem Drucke der Fall ist.

Der Funke zersetzt Ammoniakgas und schweres Kohlenwasserstoffgas, und bewirkt auch eine mit Explosion verbundene chemische Verbindung, wenn derselbe durch ein Gemenge von Knallgasen geführt wird. So werden z. B. gleiche Volumina

Digitized by Google

Chlor und Wasserstoff durch den Funken zum Explodieren gebracht; desgleichen Sauerstoff und Wasserstoff, wenn man beide Gase im Verhältnis von 2 Volumen des letztern zu einem des erstern mit einander mischt. Selbst das explodierende Gemisch des gewöhnlichen Kohlengases mit einem 4 bis 10mal grösseren Volumen gewöhnlicher Luft lässt sich auf diese Weise verpuffen. Der bekannte Versuch mit der sogenannten *elektrischen Pistole* besteht darin, dass man ein kleines Metallgefäss mit explodierenden Gasen anfüllt und dieselben dann durch einen Funken zum Explodieren bringt. Die Funkenentladung wendet man auch bei militärischen Operationen zum Abfeuern von Sprengungen an, indem man auf den Weg des Funkens etwas Knallpulver schüttet, welches dann die grössere Menge des Schiesspulvers oder des andern Sprengstoffes entzündet. (Vergl. auch Art. 370.)

287. Physiologische Wirkungen. Die physiologischen Wirkungen des Stromes sind in der 19. Vorlesung beschrieben worden. Diejenigen Wirkungen, welche die Funkenentladung hervorbringt, sind ihrem Charakter nach plötzlicher, doch im Allgemeinen von derselben Natur. Die Leichname von durch Blitz getöteten Personen zeigen häufig Spuren rötlicher Färbung an denjenigen Stellen, wo der Blitz beim Durchgange durch die Gewebe diese zerrissen oder vernichtet hat. Bisweilen haben diese Spuren ein sonderbares, verzweigtes Aussehen, als wenn der Funke bei seinem Eintritte sich netzartig über die Oberfläche ergossen hätte.

288. Wärmewirkungen. Das Durchströmen der Elektrizität durch ein Widerstand leistendes Medium ist unter allen Umständen von einer Wärmeentwicklung begleitet. Die Gesetze über die durch Ströme erzeugte Wärme finden sich in Art. 367. Die Funkenentladung ist ein von Wärmeentwicklung begleiteter Durchgang der Elektrizität durch ein Medium von grossem Widerstande. Ein Paar Tropfen Aether lassen sich in einem Metalllöffel durch einen elektrischen Funken leicht entzünden. Der Funke einer Elektrisiermaschine oder selbst der eines geriebenen Glasstabes ist heiss genug, um eine gewöhnliche Gas-

Digitized by Google

lampe anzuzünden. In gewissen Gegenden genügt während der trockensten Jahreszeit das blosse Reiben der Schuhe auf dem Teppiche beim Gehen über die Dielen, um so viel Elektrizität zu erzeugen, dass man Funken aus seinem eigenen Körper ziehen kann, und dass man nur einen Finger auszustrecken nötig hat, um durch einen einzigen Funken das Gas anzuzünden. Schiesspulver lässt sich durch die Entladung einer Leydener Flasche entzünden, nur muss man den Funken verzögern, indem man ihn durch einen feuchten Faden führt, denn sonst würde das Pulver durch den Funken bloss zerstreut werden.

Das von Kinnersley erfundene *elektrische Lufthermometer* [1]) hat den Zweck, die Wärme-Wirkung der Entladung zu untersuchen. Dasselbe besteht aus einem mit Luft gefüllten Glasgefässe, welches mit einer zum Teil mit Wasser oder einer andern Flüssigkeit gefüllten Röhre in Verbindung steht, um Aenderungen des Volumens oder Druckes zu beobachten. In dieses Gefäss führen 2 Metallstäbe, zwischen denen ein dünner Draht gezogen ist oder ein Faden Goldpapier; oder es kann einfach ein Funke von dem einen auf den andern überspringen. Beim Durchgehen des Funkens wird die eingeschlossene Luft erwärmt, dieselbe dehnt sich aus, und veranlasst eine Bewegung der als Index dienenden Flüssigkeitssäule. Mascart hat den Apparat noch vervollständigt, indem er an demselben einen Selbstverzeichner anbrachte. Die Beobachtungsresultate mit diesen Apparaten sind folgende: Die Wärmewirkung, welche eine gegebene Ladung in einem Drahte von gegebener Länge hervorbringt, ist dem Quadrate des Querschnitts des Drahtes umgekehrt proportional. Die Wärmewirkung ist um so grösser, je langsamer die Entladung stattfindet. Die totale entwickelte Wärme ist zusammen der Ladung proportional und dem Potential, um wel-

1) Dieser Apparat unterscheidet sich nicht wesentlich von demjenigen, welcher 90 Jahre später von Riess erfunden wurde, dem der Apparat oft zugeschrieben wird. Riess leitete jedoch quantitative Gesetze ab, während Kinnersley sich auf qualitative Beobachtungen beschränkte. Auch Snow Harris kam Riess in verschiedenen Punkten seiner Untersuchungen zuvor.

Digitized by Google

ches dieselbe fällt. Wenn in der That die gesamte Energie der Entladung zur Wärmeentwicklung gebraucht wird, ohne eine andere Arbeit zu verrichten, so ist die entwickelte Wärme gleich dem Wärmeäquivalent von $\frac{1}{2}$ QV oder gleich $\frac{QV}{2J}$ Wärmeeinheiten, wo J das mechanische Wärmeäquivalent bedeutet (J = 42 Millionen, da 42×10^6 Erg = 1 Gramm-Calorie) und Q und V in C.G.S Einheiten ausgedrückt sind.

Findet eine kräftige Entladung durch sehr dünne Drähte statt, so können dieselben bis zur Rotglühhitze erhitzt und durch die entwickelte Wärme sogar geschmolzen werden. Van Marum erhitzte einst auf diese Weise durch eine kräftige Entladung einen Draht von 70 Fuss Länge. Ein schmaler Streifen Zinnfolie wird durch die Ladung einer Leydener Flasche oder einer Batterie ohne weiteres geschmolzen. Ein Stück Blattgold wird in gleicher Weise unter der plötzlichen Erwärmung einer kräftigen Entladung verflüchtigt; und Franklin benutzte diese Eigenschaft zu einem Verfahren, um *Portraits* und andere Muster zu vervielfältigen, welche zuerst auf Karten ausgeschnitten und dann in einer Silhouette von metallischen Teilchen auf einer zweiten Karte reproduziert wurden, indem man über dieselben einen Bezug von Blattgold oder Blattsilber legte, welches wiederum mit einem Stück Papier bedeckt war, und dann die Ladung einer Leydener Batterie durch das Blatt zwischen den Knöpfen eines gewöhnlichen Ausladers hindurchschickte.

289. Licht-Wirkungen. Die Lichtwirkungen der Entladung zeigen viele schöne, interessante Abwechslungen unter verschiedenen Umständen. Der *Entladungsfunke* ist gewöhnlich ein dünner glänzender Lichtstreif. Findet die Entladung zwischen zwei Metallkugeln statt, die nur durch einen kurzen Zwischenraum von einander getrennt sind, so erscheint der Funke gewöhnlich als eine einfache dünne glänzende Linie. Ist der Abstand jedoch einige Zentimeter gross, so bewegt sich der Funke in einer unregelmässigen Zick-Zack-Linie. Auf alle Fälle nimmt er seine Bahn längs der Linie von geringstem Wider-

Digitized by Google

stande, indem das Vorhandensein kleiner, in der Luft umherfliegender Staubteilchen vollkommen genügt, um die Art der Zickzackbahn zu bestimmen. In vielen Fällen zeigt der Funke merkwürdige Verzweigungen und Verästelungen, wovon Fig. 107

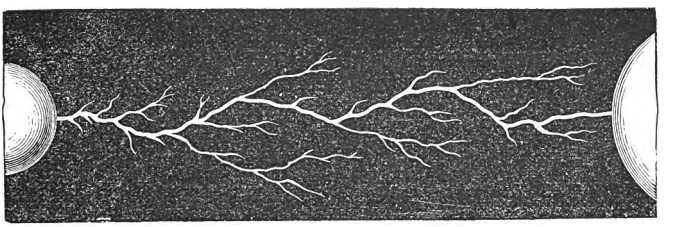

Fig. 107.

ein Bild gibt; hier ist ein Funke von einer Cuthbertson'schen Elektrisiermaschine in $\frac{1}{8}$ seiner natürlichen Grösse abgebildet. Die Entladung einer Leydener Flasche gibt einen viel helleren, kürzeren und geräuschvolleren Funken, als wenn man dem Kollektor einer Maschine direkt einen Funken entzieht. Die Länge (vergl. Art. 291) hängt von dem Potential und von dem Drucke und der Temperatur der Luft ab, in welcher die Entladung stattfindet. Der Glanz hängt besonders von der Menge der sich entladenden Elektrizität ab. Die Farbe des Funkens variiert mit der Beschaffenheit der Metallflächen, zwischen welchen die Ausladung stattfindet. Zwischen Kupfer oder Silber nimmt der Funke eine grüne Färbung an, während derselbe bei Eisen rötlich aussieht. Untersucht man den Funken mit dem Spektroskop, so entdeckt man in demselben die charakteristischen Streifen der weissglühenden Dämpfe der verschiedenen Metalle; denn der Funke reisst beim Ueberspringen kleine Teile von den Metalloberflächen ab und verflüchtigt dieselben.

290. Büschelentladung, Glimmentladung. Wird eine Elektrisiermaschine stark in Thätigkeit gesetzt, ohne dass man Funken aus ihrem Kollektor zieht, so bemerkt man (in einem dunkeln Zimmer) ein feines divergierendes *Büschel* von blassblauem Lichte, welches dem Metallknopfe an demjenigen Ende entströmt, welches am weitesten von dem Saugkamme ent-

Digitized by Google

fernt ist; diese Art der Entladung ist stets von einem zischenden oder knisternden Geräusch begleitet. Die Büschelentladung besteht aus unzähligen feinen zweigähnlichen Verästelungen, von denen Fig. 108 eine Art darstellt. Der Glanz und die Grösse

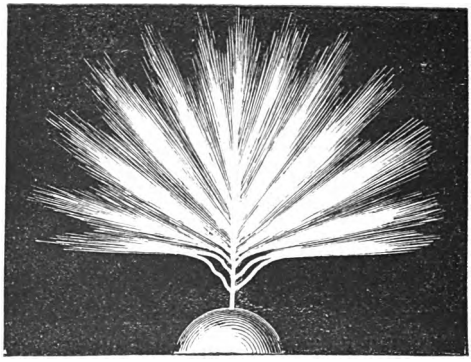

Fig. 108.

des Büschels lässt sich dadurch erhöhen, dass man in einiger Entfernung von demselben eine flache Scheibe aufstellt. Bei einer kleinern Kugel oder bei einem stumpf zugespitzten Drahte erscheint das Büschel kleiner, ist jedoch deutlicher und kontinuierlicher. Die Büschelentladung ist grösser und mehr verzweigt bei einer + Ladung als bei einer negativen. Wheatstone fand mit seinem Rotationsspiegel, dass die Büschelentladung in Wirklichkeit eine Reihe von aufeinander folgenden Teilfunken in raschen Intervallen ist.

Wird das stumpfe Drahtende oder der abgerundete Konduktor durch eine Spitze ersetzt, so verschwindet das Büschel und an seine Stelle tritt ein ruhiges kontinuierliches Glimmen, da, wo die elektrischen Lichtteilchen von der Spitze wegströmen. Hindert man diese Konvektions-Ströme, so tritt statt des Glühens wieder ein Büschel auf. Wird eine negative Ladung an einer Spitze entladen, so scheint bisweilen das Glühen von der Oberfläche des Konduktors durch einen dunkeln Raum getrennt zu sein, in welchem die Luft, ohne zu leuchten, doch die Elek-

Digitized by Google

trizität weiter leitet. Diese Erscheinung, welche Faraday die *„dunkle" Entladung* nannte, lässt sich sehr gut beobachten, wenn die Elektrizität durch verdünnte Luft und andere Gase in leeren Röhren entladen wird.

291. Funkenlänge. Im allgemeinen nimmt die Funkenlänge zwischen zwei Konduktoren mit ihrer Potentialdifferenz zu. Erstere nimmt auch bei einer Verminderung des Luftdrucks zu. Riess fand, dass die Länge etwas mehr als im Verhältnis der Potentialdifferenz zunimmt. W. Thomson maass mit Hilfe eines »absoluten Elektrometers« (Art. 261) diejenige Potentialdifferenz, welche erforderlich ist, um zwischen 2 parallelen Platten in verschiedenen Abständen eine Funkenentladung zu erzeugen. Seine genauen Versuche bestätigen die Beobachtung von Riess. Um z. B. einen Funken bei einem Abstande von 0,1 mm zu erzeugen, ist eine Potentialdifferenz von 2,7 (willkürlichen) Einheiten erforderlich; bei 0,5 mm 7,3 Einheiten; bei 1 mm 12,6 Einheiten; bei 1,5 mm 17,3 Einheiten. De la Rue und Müller haben mit Hilfe ihrer grossen Batterie (Art. 174) gefunden, dass bei einer Potentialdifferenz von 1000 Volt die Funkenlänge nur 0,127 cm betrug und bei einer Potentialdifferenz von 10,000 Volt 1,369 cm. Ihre 11,000 Silber-Elemente gaben einen 1,59 cm langen Funken. Um durch Luft von gewöhnlichem Drucke einen eine Meile langen Funken zu erzeugen, würde daher eine Potentialdifferenz erforderlich sein, welche diejenige von 1,000,000,000 Daniell'schen Elementen noch überträfe.

Die Funkenlänge ist in verschiedenen Gasen nicht dieselbe; sie ist z. B. in Wasserstoff 2mal grösser wie in Luft von gleicher Dichte, und in Luft grösser als in Kohlensäure.

Im luftverdünnten Raume ist der Funke länger. Snow Harris ermittelte, dass die Funkenlänge dem Drucke umgekehrt proportional ist, doch ist dieses Gesetz nicht ganz korrekt, sondern nur annähernd richtig für Drucke zwischen 30 und 70 cm Quecksilber. Bei niedrigeren Drucken muss man, wie Gordon kürzlich nachgewiesen hat, eine grössere Potentialdifferenz anwenden, als das Snow Harris'sche Gesetz bestimmt. Hieraus

Digitized by Google

scheint hervorzugehen, dass dünne Luftschichten der durchbohrenden Kraft des Funkens einen verhältnismässig grössern Widerstand bieten, als dicke Schichten, und grössere dielektrische Stärke besitzen.

Ein vollkommenes Vakuum ist ein vollkommener Isolator, kein Funke geht durch dasselbe hindurch. Es ist möglich, eine Röhre so vollkommen leer zu pumpen, dass keine unserer Elektrisiermaschinen oder elektrischen Apparate imstande ist, auf eine Entfernung von nur einem Zentimeter einen Funken durch den leeren Raum zu senden.

Andererseits verstärkt eine grosse Druckerhöhung auch die dielektrische Stärke der Luft, und verleiht ihr eine grössere Widerstandskraft gegen den Durchgang eines Funkens. Cailletet komprimierte trockene Luft auf 40 bis 50 Atmosphärendrucke und fand, dass selbst der Funke einer kräftigen Induktionsrolle nicht imstande war, einen Weg von 0,05 cm Länge zu überspringen. Die Funkenlänge (in der Luft) wird auch von der Temperatur beeinflusst, indem die Funken in heisser Luft länger und gerader als in kalter Luft sind.

Flammen und Ströme sehr heisser Luft, wie sie z. B. rotglühendes Eisen ausströmt, sind äusserst gute Leiter der Elektrizität, und wirken bei der Entladung eines geladenen Konduktors noch besser als Metallspitzen. Gilbert zeigte, dass ein elektrischer Körper, der in die Nähe einer Flamme gebracht wurde, seine Ladung verlor; und die schnellste Art, der Oberfläche eines geladenen Körpers von geringer Leitungskraft die ihr durch Reibung oder auf andere Weise mitgeteilte Ladung zu entziehen, besteht darin, den Körper durch die Flamme einer Spiritus-Lampe zu ziehen. Faraday fand, dass negative Elektrizität auf diese Weise sich leichter entlud, als positive. Stark negativ elektrisierte Flammen werden von Konduktoren abgestossen, positiv elektrisierte dagegen nicht. W. Grove hat gezeigt, dass ein Strom in einem Drahte entsteht, dessen eines Ende die Spitze und dessen anderes Ende die Basis einer Flamme berührt.

Digitized by Google

292. Entladungen in luftverdünnten Räumen. Findet die Entladung in Glasröhren oder Glasgefässen statt, aus denen die Luft zum Teil ausgepumpt ist, so lassen sich manche bemerkenswerte und schöne Lichterscheinungen beobachten. Eine gewöhnliche Form des Gefässes ist das »elektrische Ei« (Fig. 150), eine Art ovaler Flasche, welche sich an eine Luftpumpe schrauben lässt und die mit Metallknöpfen versehen ist, um die Funken hineinzuführen. Gewöhnlich benutzt man »luftleere Röhren«, wie dieselben von dem berühmten Geissler angefertigt werden. Diese sind einfach Röhren aus dünnem Glase, die zu einer Kugel oder Spirale geblasen sind und welche 2 Elektroden von in das Glas geschmolzenen Platindrähten haben; die Röhren werden zugesiegelt, nachdem die Luft zum Teil durch eine Quecksilber-Luftpumpe entfernt ist. Von diesen Geissler'schen Röhren sind die brauchbarsten diejenigen, welche aus zwei durch eine sehr enge Röhre verbundenen Kugeln bestehen, da die Lichtwirkungen in dem verengten Teile gewöhnlich intensiver sind. Solche Röhren werden durch einen Funken von einem Elektrophor oder einer Elektrisiermaschine sofort erleuchtet; doch ist es gebräuchlicher, den Funken einer Induktionsrolle (Fig. 148) durch sie hindurchgehen zu lassen.

Bevor die Röhren luftleer gepumpt sind, geht der Funke durch dieselben, ohne dass irgend welche ungewöhnlichen Erscheinungen dabei auftreten. Fängt man an die Luft auszupumpen, so sind die Funken weniger scharf begrenzt und es breiten sich dieselben aus, so dass sie die ganze Röhre ausfüllen, wobei ihre Färbung bleich und ihre Gestalt nebelig wird. Die negative Elektrode zeigt ein schönes bläuliches oder violettes Glimmlicht, welches von dem Konduktor durch einen schmalen, dunklen Raum getrennt ist, während an der + Elektrode bloss ein einziger kleiner heller Lichtstern bemerkt wird. Häufig zerlegt sich das Licht in eine Reihe von Schichten oder Lichtflecken von kelchähnlicher Gestalt, welche zwischen dunklern Stellen hin und her vibrieren. Im Stickstoff ist das violette Licht um den negativen Pol herum sehr hell, während

Digitized by Google

das übrige Licht eine rosa Färbung hat. Im Sauerstoff ist der Unterschied nicht so deutlich. Im Wasserstoff ist die Entladung von bläulicher Farbe, ausgenommen an den engen Stellen der Röhren, wo man ein schönes Karmoisinrot erblickt. In Kohlensäure ist das Licht merklich weiss. Von der negativen Elektrode werden Metallteilchen abgerissen und von der Oberfläche derselben weggeschleudert. Die —Elektrode ist auch gewöhnlich die wärmere, falls beide Elektroden von gleicher Grösse sind. Man hat auch beobachtet, dass das Licht dieser Entladungen im leeren Raume reich an jenen Strahlen ist, welche Phosphoreszenz und Fluoreszenz erzeugen. Man hat daher viele schöne Erscheinungen, wenn man zur Anfertigung der Röhren Uran-Glas verwendet, welches mit schönem grünen Lichte fluoresziert, und wenn man in eine äussere Glasröhre Lösungen von Chinin oder andere fluoreszierende Flüssigkeiten thut.

293. Erscheinungen in stark luftverdünnten Räumen. Wenn man die Verdünnung der Luft bis zu einem sehr hohen Grade fortsetzt, so vergrössert sich, wie Crookes gefunden hat, die Breite des dunklen Raumes, welcher das negative Glimmlicht vom negativen Pole trennt, und durch diesen Raum fliegen elektrisierte Moleküle auf parallelen Bahnen, welche senkrecht zur Oberfläche der Elektroden stehen. Der hauptsächlichste Umstand, auf den sich diese Theorie stützt, ist der folgende: Wenn die Verdünnung der Luft schon so weit getrieben ist, dass der dunkle Raum die ganze Röhre oder die ganze Kugel einnimmt, und man alsdann (durchsichtige oder undurchsichtige) Körper vor die Elektrode stellt, so bilden sich auf der gegenüberliegenden Wand des Gefässes scharf abgegrenzte **Schatten** dieser Körper, als wenn sie einigen der fliegenden Moleküle den Durchgang versagten und dieselben verhinderten, die gegenüberliegende Wand zu treffen. Leicht bewegliche Fähnchen werden in Umdrehung versetzt, wenn man sie in der Bahn der Entladung aufstellt. Holtz hat in neuerer Zeit »elektrische Schatten« mittelst Entladungen in der Luft bei gewöhnlichem Drucke erzeugt, zwischen den Polen seiner bekannten Maschine

Digitized by Google

(Fig. 29), wobei die Entladung zwischen einer Spitze und einer mit Seide umwickelten Scheibe stattfand, welche die Schatten auffängt.

294. Schichten. Die Schichtungen sind sehr sorgfältig von Gassiot, Spottiswoode und De la Rue untersucht worden. Die bisher gesammelten Thatsachen sind folgende: Die Schichten entstehen an der + Elektrode bei einem gewissen Drucke und treten um so zahlreicher auf, je stärker die Luft verdünnt wird, bis zu einer gewissen Grenze, wo sie dicker und weniger zahlreich erscheinen, bis die Verdünnung so weit fortgesetzt ist, dass eine Entladung nicht mehr stattfindet. Die Schichten sind heisser, als die zwischen ihnen befindlichen Stellen. Die Zahl und Lage der Schichten richtet sich nicht allein nach der Stärke der Verdünnung, sondern auch nach der Potentialdifferenz der Elektroden. Wenn die Schichten durch die intermittierenden Entladungen der Induktionsrolle erzeugt werden, so ergibt sich durch Prüfung mit einem Rotationsspiegel, dass sie sich von der + Elektrode zur negativen bewegen.

Schuster hat kürzlich gezeigt, dass die Entladung der Elektrizität durch Gase ein Prozess ist, welcher mit dem der Elektrolyse (Art. 418) Aehnlichkeit hat, und der von einer Zerlegung der Gasmoleküle und einem fortwährenden Austausch der Atome zwischen denselben begleitet ist. Die Erzeugung von Ozon (Art. 298) und die an der — Elektrode beobachteten Erscheinungen (Art. 292) unterstützen diese Ansicht ohne Zweifel.

Die Entladungen in luftleeren Röhren werden bei jedem Grade der Verdünnung von dem Magnet beeinflusst; derselbe wirkt auf dieselben wie auf biegsame Leiter. Unter gewissen Bedingungen ist die Entladung auch für die Nähe eines Konduktors ausserhalb der Röhre empfindlich, und zieht sich von der Seite, wo derselbe genähert wird, zurück. Dieser empfindliche Zustand scheint die Folge eines periodischen Intermittierens in der Entladung zu sein; ein Intermittieren oder teilweises Intermittieren in der Strömung würde wahrscheinlich ebenfalls die Erzeugung von Schichten erklären.

295. Elektrische Oszillationen. Federsen untersuchte den Funken einer Leydener Flasche mittelst eines Rotationsspiegels und fand, dass derselbe nicht eine einfache augenblickliche Entladung war, sondern ein gewisses Fluktuieren aufwies [1]). Bei sehr geringen Widerständen im Schliessungsbogen fand eine wirkliche Oszillation der Elektrizität rückwärts und vorwärts kurze Zeit lang statt, wobei diese abwechselnden Partialentla-

1) Die Erscheinung der oszillierenden Entladung wurde von W. Thomson vorhergesagt aus rein theoretischen Betrachtungen über die Gleichungen der Selbst-Induktion.

Digitized by Google

dungen wahrscheinlich eine Folge der Selbst-Induktion des Schliessungsbogens waren. Bei einem bestimmten grössern Widerstande fand die Entladung kontinuierlich, aber nicht momentan statt. Bei einem noch grössern Widerstande bestand die Entladung aus einer Reihe von einzelnen intermittierenden Entladungen, welche in derselben Richtung auf einander folgten. Wurden solche Funken im Rotationsspiegel betrachtet, so zeigten sie eine Reihe getrennter Bilder in fast gleichen Abständen von einander. Es ergab sich, dass die Periode der Oszillationen der Quadratwurzel der Kapazität des Kondensators proportional war.

296. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Entladung. Die erste Anwendung des Rotationsspiegels zur Untersuchung von Erscheinungen von kurzer Dauer machte Wheatstone, welcher auf diese Weise »die Geschwindigkeit der Elektrizität« in leitenden Drähten zu messen versuchte. Seine Resultate gaben jedoch nicht die *Geschwindigkeit der Elektrizität*, sondern die Zeit, welche eine ganz bestimmte Elektrizitätsmenge gebraucht, um durch einen Konduktor von bedeutendem Widerstande und beträchtlicher Kapazität zu fliessen. Im Rotationsspiegel betrachtet, würde ein Funke von begrenzter Dauer als ein langer Streifen erscheinen. Eine derartige Verlängerung konnte man wahrnehmen, wenn eine Leydener Flasche durch einen Kupferdraht von einer halben Meile Länge entladen wurde; und wenn der Schliessungsbogen an drei Stellen unterbrochen wurde, in der Mitte und an beiden Enden des Drahtes, so erhielt man 3 Funken, welche im Spiegel eine seitliche Verschiebung zeigten, indem sie (bei der angewendeten bestimmten Rotationsgeschwindigkeit) angaben, dass der mittlere Funke den 1,520,000ten Teil einer Sekunde später erfolgte als die an den Enden. Wheatstone schloss hieraus auf eine Geschwindigkeit von 288,000 Meilen pro Sekunde. Faraday zeigte jedoch, dass die scheinbare Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Elektrizitätsmenge von der Kapazität des Konduktors beeinflusst werden müsse; und er sagte sogar voraus, dass ein untergetauchtes, isoliertes Kabel,

Digitized by Google

da es wie eine Leydener Flasche wirkt (vergl. Art. 274) und geladen werden muss, bevor das Potential an dem entfernten Ende steigen kann, das scheinbare Strömen der Elektrizität durch dasselbe verzögert. Professor Fleeming Jenkin sagt von einem der Atlantischen Kabel, dass man nach erfolgter Berührung mit der Batterie an dem einen Ende 0,2 Sekunden lang keine Wirkung an dem andern Ende verspüren kann, und dass dann der aufgenommene Strom allmählich zunimmt, bis er nach circa 3 Sekunden sein Maximum erreicht und dann verschwindet. Diese Verzögerung ist dem Quadrate der Länge des Kabels und ferner seiner Kapazität und seinem Widerstande proportional; daher wird dieselbe bei langen Kabeln recht empfindlich, da sie die Schnelligkeit des Telegraphierens reduziert. In der That gibt es keine bestimmte angebbare »Geschwindigkeit der Elektrizität«.

Ein sehr einfacher Versuch setzt den Leser in den Stand, die ausserordentlich kurze Dauer des Funkens einer Leydener Flasche zu bethätigen. Man nehme eine runde Scheibe von Kartenpapier, welche mit schwarzen und weissen Sektoren bemalt ist, und versetze dieselbe in sehr schnelle Rotation, so dass man bei gewöhnlichem Lichte nur eine einzige graue Fläche erblickt. Wird diese durch den Funken einer Leydener Flasche erleuchtet, so scheint sie absolut still zu stehen, wie schnell sich dieselbe auch drehen mag. Ein Blitz ist ebenfalls momentan; es ist völlig unmöglich, zu bestimmen, an welchem Ende der Blitz beginnt [1]).

297. Elektrische Staubfiguren. Ueber die Oberfläche schlechter Leiter kann die Elektrizität sich langsam ausbreiten. Lichtenberg erfand eine sinnreiche Methode, die Verteilung der Elektrizität mittelst gewisser Staubfiguren zu untersuchen. Der Versuch ist sehr einfach. Man nehme eine geladene Leydener

1) Bald scheint der Blitz aus den Wolken nach unten, bald von der Erde nach oben zu schlagen. Dies ist eine optische Täuschung, welche eine Folge der ungleichmässigen Empfänglichkeit ist, welche verschiedene Teile der Netzhaut des Auges gegen das Licht zeigen.

Digitized by Google

Flasche und schreibe mit dem Knopfe derselben auf einem Schellackkuchen oder einer trockenen Glasscheibe. Dann siebe man durch ein Stück Musselin ein Gemenge von gepulvertem Mennige und Schwefel über den Schellackkuchen (Zinnober und Lycopodiumpulver thun dieselben Dienste). Die beiden Pulver reiben sich bei diesem Vorgange an einander, die Mennige wird +, der Schwefel negativ. Deshalb wird der Schwefel von denjenigen Teilen der Scheibe angezogen, welche + elektrisch sind, und setzt sich in eigentümlichen, verzweigten gelben Strahlen fest, wie es die Fig. 109 zeigt. Die Mennige setzt sich in

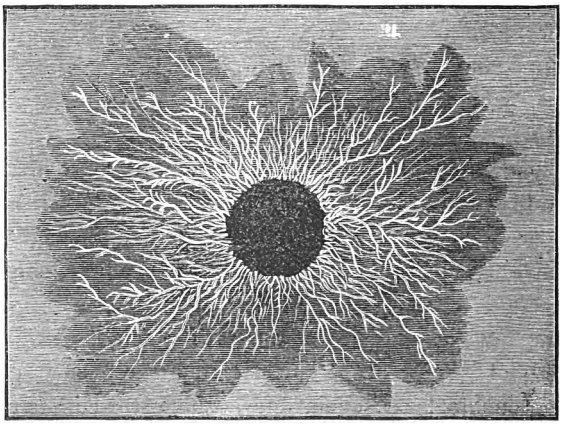

Fig. 109.

kleinen roten Haufen und Flecken an denjenigen Stellen fest, wo negative Elektrizität ist. Fig. 110 zeigt diejenige *Lichtenberg'sche Figur*, welche entsteht, wenn man den Knopf der Leydener Flasche an den Mittelpunkt einer Schellackscheibe hält, welche vorher mit Flannell gerieben worden ist, so dass die negative Elektrizität auf allen Seiten nach der im Mittelpunkte befindlichen + Ladung gezogen wird.

Wird gepulverter Turmalin erwärmt und dann über eine Glasscheibe gesiebt, welche vorher unregelmässig elektrisiert worden ist, so ergeben sich ähnliche, doch nicht so scharf begrenzte Figuren.

Digitized by Google

Hauch-Bilder lassen sich herstellen, wenn man eine Münze oder ein Stück Metall, welches auf eine trockene Glasscheibe gelegt ist, elektrisiert und dann auf das Glas haucht, da wo die Münze lag; auf diese Weise erzeugt man eine schwache Abbildung derselben auf der Oberfläche des Glases.

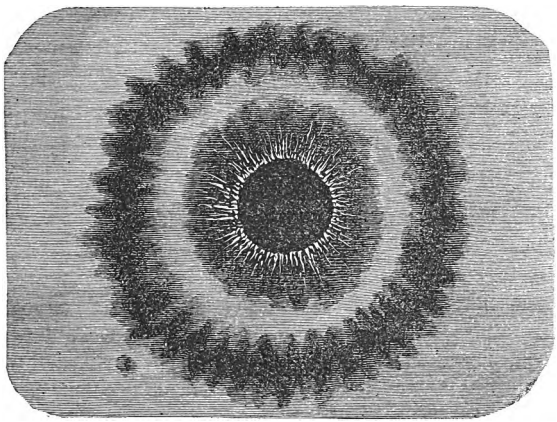

Fig. 110.

298. Erzeugung von Ozon. Jedesmal, wenn eine Elektrisiermaschine in Thätigkeit gesetzt wird, bemerkt man einen eigentümlichen Geruch. Früher hielt man denselben als einen Beweis für das Vorhandensein eines elektrischen Fluidums; jetzt weiss man, dass derselbe eine Folge des *Ozons* ist, einer modifizierten Form des Sauerstoffs, welche sich vom gewöhnlichen Sauerstoff dadurch unterscheidet, dass sie dichter und chemisch aktiver ist, und einen charakteristischen Geruch hat. Die Entladung der Maschine von Holtz und diejenige der Induktionsrolle begünstigen vorzugsweise die Bildung dieses Körpers.

299. Entweichung der Ladung. Ein geladener Konduktor mag noch so gut isoliert und die umgebende Luft noch so trocken sein, so verliert er trotzdem langsam seine Ladung und ist nach einigen Tagen vollständig entladen. Die Art und Weise des Verlorengehens der Ladung ist jedoch nicht gleichförmig. Der Verlust ist der Potentialdifferenz zwischen dem

Digitized by Google

Körper und der Erde annähernd proportional. Deshalb ist der Verlust anfangs verhältnismässig grösser als nachher, und ebenso ist derselbe für stark geladene Körper grösser als für schwach geladene. Das Gesetz, nach welchem die Ladung entweicht, hat daher Aehnlichkeit mit Newton's Gesetz der Abkühlung, nach welchem die verhältnismässige Abkühlung eines heissen Körpers der Temperaturdifferenz zwischen ihm und den Gegenständen seiner Umgebung proportional ist. Wird das Potential des Körpers in gleichen Zeitintervallen gemessen, so findet man, dass dasselbe in fallender geometrischer Reihe abgenommen hat; oder die Logarithmen der Potentiale nach gleichen Zeitintervallen bilden eine arithmetische Reihe.

Dies lässt sich durch folgende Gleichung wiedergeben:

$$V_t = V_o e^{-pt},$$

wo V_o das ursprüngliche Potential bedeutet, und V_t das Potential nach der Zeit t. Die Zahl e hat den Wert 2,71828 ... (die Basis der natürlichen Logarithmen), p bedeutet den »Entweichungs-Koeffizienten«, welcher von der Temperatur, dem Drucke und der Feuchtigkeit der Luft abhängt.

Der Verlust ist jedoch an negativ elektrischen Oberflächen verhältnismässig grösser als an positiv elektrischen.

300. Positive und negative Elektrisierung. Dem Leser werden gewiss während dieser ganzen Vorlesung die häufigen Unterschiede im Verhalten der + und — Elektrizität aufgefallen sein. Die auffallende Verschiedenheit der Lichtenberg'schen Figuren, die Verschiebung der Durchbohrungsstelle bei dem Lullin'schen Versuche, das ungleiche Streben, von den Oberflächen zu entweichen, die bemerkenswerten Unterschiede bei den verschiedenen Arten der Büschel- und Glimmentladung, alles dieses sind Dinge, welche unsere Aufmerksamkeit beanspruchen. Gassiot beschrieb die Erscheinung in luftleeren Röhren als die Folge einer Kraft, welche vom negativen Pole ausging. Crookes' Versuche in Räumen, wo die Luft sehr stark verdünnt ist, zeigen, dass die Moleküle von der negativen Elektrode heftig entladen werden, wobei die Flügel einer kleinen, in solche Röhren eingeschlossenen Windmühle von der Seite, welche von der negativen Entladung getroffen wird, bewegt

Digitized by Google

werden. Werden in einer luftleeren Röhre trichterförmige Abteilungen angebracht, so ist, wie Holtz gefunden hat, der Widerstand bedeutend geringer, wenn die Oeffnungen der Trichter nach der negativen Elektrode gerichtet sind. Diese Thatsachen sind bis jetzt noch durch keine der existierenden Theorieen über Elektrizität erklärt.

Der Verfasser dieser Vorlesungen ist geneigt, folgende Ansicht über diesen Gegenstand aufzustellen: Wenn die Elektrizität wirklich etwas einfaches und nichts dualistisches ist, so muss entweder die sogenannte + Elektrizität oder die — Elektrizität derjenige Zustand sein, in welchem mehr Elektrizität vorhanden ist, als in dem umgebenden Raume, und die andere Art muss ein Zustand sein, in welchem weniger Elekrizität vorhanden ist. Im Art. 6 wurde erwähnt, dass wir bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft nicht genau wissen, ob »+« Elektrizität wirklich ein Mehr oder ein Weniger von Elektrizität ist. Nun scheinen einige der in diesem Artikel angeführten Erscheinungen darauf hinzudeuten, dass die sogenannte »negative« Elektrizität in Wirklichkeit der Zustand des Mehr ist. Insbesondere weist hierauf der Umstand, dass das Entweichen der Ladung für —Elektrizität grösser ist, als für +; weil das Gesetz vom Entweichen der Ladung das genaue Gegenteil des Gesetzes vom Entweichen der Wärme ist, bei welchem es ganz sicher ist, dass bei gleichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Körper und seiner Umgebung das Entweichen der Wärme für höhere Temperaturen verhältnismässig schneller stattfindet als für niedrige; oder der Körper, welcher in Wirklichkeit wärmer ist, seine Wärme am schnellsten verliert.

XXIV. VORLESUNG: *Atmosphärische Elektrizität.*

301. Die Erscheinungen der atmosphärischen Elektrizität sind zweierlei Art: Die wohlbekannten elektrischen Erscheinungen des Gewitters und diejenigen der beständigen geringen Elektrisierung in der Luft, welche man am besten bei schönem Wetter beobachten kann. Die Erscheinungen des Nordlichts bilden eine dritte Gruppe dieses Gegenstandes.

302. Das Gewitter, eine elektrische Erscheinung. Die knisternden Funken, welche sich einer Elektrisiermaschine oder einer Leydener Flasche entziehen lassen, führten die ersten Versuchsansteller Hawkesbee, Newton, Wall, Nollet und Gray zu der Vermutung, dass der Blitz und der Donner eine

Digitized by Google

Folge elektrischer Entladungen seien. Im Jahre 1749 kam Benjamin Franklin, welcher die Bemerkung gemacht hatte, dass der Blitz fast alle von elektrischen Funken bekannten Eigenschaften [1]) besitzt, auf den Gedanken, die von ihm entdeckte elektrische Wirkung von Spitzen (Art. 43) an Gewitterwolken zu versuchen, und er entzog ihnen auf diese Weise eine elektrische Ladung. Er machte daher den Vorschlag, an einem hohen Turme einen zugespitzten Eisenstab zu befestigen. Bevor er sein Vorhaben ausführen konnte, errichtete Dalibard, der Franklin's Vorschlag aufnahm, in Marly-la-ville in der Nähe von Paris einen 40 Fuss hohen Eisenstab, mit Hilfe dessen es ihm gelang, einer vorbeiziehenden Wolke Funken zu entziehen. Franklin erreichte seinen Zweck kurze Zeit darauf in anderer Weise. Er liess während eines Gewitters einen Papierdrachen steigen, und es ergab sich, dass die nass gewordene Schnur die Elektrizität zur Erde leitete und dann zahlreiche Funken gab. Diese zog er aus einem an die Schnur gebundenen Schlüssel, indem er zur Sicherheit zwischen seine Hand und den Schlüssel ein seidenes Band hielt. Leydener Flaschen konnte er durch die aus den Wolken gezogenen Funken laden und alle andern elektrischen Wirkungen hervorbringen. Der Beweis der Identität war vollständig. Der Drachenversuch wurde von Komas wiederholt, welcher aus einer Metallschnur 9 Fuss lange Funken zog, ebenso von Cavallo, welcher viele wichtige Beobachtungen über atmosphärische Elek-

1) Franklin zählt die Uebereinstimmung zwischen Elektrizität und Blitz folgendermaassen auf: Erzeugung von Licht; Farbe des Lichtes; Zickzackrichtung; schnelle Bewegung; werden durch Metalle weiter geleitet; Geräusch beim Explodieren; Leitungsfähigkeit im Wasser und Eis; Zerreissen von unvollkommenen Leitern; Tötung von Tieren; Schmelzen von Metallen; Verbrennen entzündbarer Körper, schwefelartiger Geruch (vom Ozon herrührend, wie wir jetzt wissen); früher hatte er bereits gefunden, dass Nadeln sowohl durch Blitz, als auch durch den elektrischen Funken magnetisiert werden konnten. Er machte auch auf die Aehnlichkeit des blass-blauen Lichtes aufmerksam, das man während eines Gewitters oben an den Masten der Schiffe bemerkte (die Seeleute nennen es das St. Elm's Feuer) und auf die Glühentladung an Spitzen.

Digitized by Google

trizität anstellte. Im Jahre 1753 wurde Richmann, welcher mit einem dem von Dalibard ähnlichen Apparate experimentierte in St. Petersburg von einer plötzlichen Entladung getroffen und getötet.

303. Theorie des Gewitters. Feste und flüssige Körper lassen sich nicht in ihrem Innern laden; sind sie vollständig geladen, so befindet sich die Elektrizität nur an ihrer Oberfläche (vergl. Art. 29). Gase und Dämpfe dagegen können, da sie aus unzähligen getrennten Teilchen bestehen, eine innere Ladung erhalten. Die Luft eines Zimmers, in welchem eine Elektrisiermaschine arbeitet, ist geladen. Die Wolken sind gewöhnlich mit mehr oder weniger Elektrizität geladen, welche wahrscheinlich von der an der Erdoberfläche stattfindenden Verdunstung [1]) herrührt. Da die kleinen Wasserteilchen, welche in der Luft schweben, bessere Leiter sind, als die Luft selbst, so werden dieselben stärker geladen, und da sie infolge der Schwere herabfallen und sich vereinigen, so nimmt die Stärke ihrer Ladungen noch zu. Angenommen 8 kleine Tropfen vereinigten sich zu einem einzigen. Dieser letztere besitzt alsdann die achtfache Elektrizitätsmenge, welche über die Oberfläche einer einzigen Kugel vom doppelten Radius (und deshalb von doppelter Kapazität, nach Art. 247) der ursprünglichen Tropfen verteilt ist; und das elektrische Potential dieser Kugel ist deshalb 4mal grösser. Nun kann eine Wolke aus solchen geladenen Kugeln bestehen und ihr Potential kann sich daher nach und nach durch die Vereinigung der Tropfen erhöhen; und die elektrische Ladung wird an der untern Fläche der Wolke immer stärker, indem die Oberfläche der Erde unterhalb der Wolke als Kondensatorplatte wirkt und durch Induktion mit der entgegengesetzten Art von Elektrizität geladen wird. Wird die Potentialdifferenz so gross, dass die dazwischen befindliche Luftschicht der Spannung nachgibt, so findet an der Stelle, wo die

1) Vergl. Art. 63.

Digitized by Google

Luft den geringsten Widerstand bietet, eine Funkenentladung statt. Dieser Funkenblitz, welcher unter Umständen länger als eine Meile ist, entladet nur die Elektrizität, welche sich an der Oberfläche der Wolke angesammelt hat, und die andern Teile der Wolke üben nun auf den entladenen Teil eine rückwirkende Kraft aus, indem sie innere Anziehungen und innere Entladungen veranlassen. Die auf diese Weise eingeleiteten innern Wirkungen erklären das gewöhnliche Aussehen einer Gewitterwolke, welche als scharf begrenzte Wolkenmasse mit plattem Boden auftritt, und am obern Ende in beständiger Bewegung zu kochen oder sich aufzutürmen scheint.

304. Blitz und Donner. Arago unterschied 3 Arten von Blitz: 1) *Den Zickzack-Blitz* oder *„den gezackten Blitz“*, welcher gewöhnlich stattfindet. Die Zickzack-Gestalt rührt wahrscheinlich her entweder von dem Vorhandensein fester Teilchen in der Luft oder von lokaler Elektrisierung an gewissen Stellen, wodurch die gebrochene Bahn diejenige vom geringsten Widerstande wird. 2) *Der Flächenblitz*, bei welchem ganze Flächen auf einmal entzündet werden, ist wahrscheinlich nur der an den Wolken stattfindende Reflex eines Blitzes, der an einer andern Stelle des Himmels auftritt. Denselben erblickt man häufig des Nachts am Horizonte, wenn er von einem Gewitter reflektiert wird, welches zu weit entfernt ist, als dass man seinen Donner noch hören könnte. Derselbe ist unter dem Namen »Wetterleuchten« bekannt. 3) *Kugelblitz*, in der Gestalt von *Feuerkugeln*, welche sich langsam vorwärts bewegen und dann in plötzlicher Explosion bersten. Diese Art ist sehr selten, muss jedoch als wirkliches Phänomen anerkannt werden, obgleich mehrere Berichte hierüber sehr übertrieben sind. Aehnliche Erscheinungen im kleinen Massstabe sind an elektrischen Apparaten (obschon gewöhnlich durch Zufall) gezeigt. Cavallo berichtet von einer *Feuerkugel*, welche sich langsam an dem Messingdrahte einer grossen, stark geladenen Leydener Flasche aufwärts bewegte und dann beim Abwärtsgehen explodierte; und Planté hat neuerlich ähnliche aber kleinere Kugelentla-

Digitized by Google

dungen seiner »rheostatischen Maschine« beobachtet, welche durch kräftige Sekundärbatterieen geladen worden war.

Der Schall des Donners kann je nach dem Blitz ein verschiedener sein. Der Funke erhitzt die Luft bei seinem Durchgange, indem er ringsum plötzliche Expansion und Kompression veranlasst, denen ein ebenso plötzliches Eindringen der Luft in den auf diese Weise erzeugten leeren Raum folgt. Ist der Funke geradlinig und kurz, so hört der Beobachter einen kurzen scharfen Schlag. Ist seine Bahn jedoch lang und nicht geradlinig, so hört er die successiven Schläge einen nach dem andern, mit einem charakteristischen *Gerassel*, und die Echo von andern Wolken *rollen* lange nachher heran. Der Blitzstrahl selbst dauert nie länger als den 100,000. Teil einer Sekunde.

Der Schaden, welchen ein Blitzstrahl anrichtet, wenn er einen unvollkommenen Leiter trifft, erscheint bisweilen als eine heftige mechanische Zertrümmerung, wie z. B. wenn das Mauerwerk eines Schornsteins oder eines Kirchturms einstürzt, bisweilen als eine Wärmewirkung, wenn Glockendrähte und metallene Gegenstände, welche sich in der Bahn des Blitzes befinden, geschmolzen werden. Die physiologischen Wirkungen plötzlicher Entladungen sind im Art. 226 besprochen. Das Mittel gegen Unglücksfälle durch Blitz besteht darin, sich einen ausreichenden Leiter zu verschaffen, welcher mit einer leitenden Erdschicht in Verbindung steht.

Der »Rückschlag«, welchen Leute in der Nähe eines Blitzes empfinden, ist bereits im Art. 26 erklärt.

305. Blitzableiter. Der erste Gedanke, das Eigentum vor der Zerstörung durch Blitz zu schützen, ging von Franklin im Jahre 1749 aus, wo er folgendes veröffentlichte:

Kann die Kenntnis dieser Kraft der Spitzen der Menschheit nicht von Nutzen sein bei der Bewahrung der Häuser, Kirchen, Schiffe etc. vor dem Blitzschlag, indem wir hierdurch darauf hingewiesen werden, auf den höchsten Teilen jener Gebäude aufrecht stehende Eisenstäbe zu errichten, die so scharf wie eine Nadel zugespitzt und, um ihr Rosten zu verhüten, vergoldet sind, und vom untern Ende dieser Stäbe einen Draht an der Aussenseite des Gebäudes entlang zu führen in das Erdreich, oder um eine der Wände eines

Digitized by Google

Schiffes, bis der Draht das Wasser berührt? Würden nicht diese zugespitzten Stäbe aller Wahrscheinlichkeit nach das elektrische Feuer, ehe es nahe genug ist, um einzuschlagen, aus einer Wolke, ohne dass wir es merken, anziehen und dadurch uns vor jenem plötzlichen und schrecklichen Ungemach bewahren?

Die 4 wesentlichen Erfordernisse eines guten Blitzableiters sind die folgenden: 1) Sein oberstes Ende muss eine Spitze sein, welche noch über den höchsten Punkt des Gebäudes hinwegragt. 2) Sein unteres Ende muss entweder in Wasser oder in eine feuchte Bodenschicht geführt werden. 3) Der Konduktor zwischen der Spitze und dem Boden muss absolut zusammenhängend und von genügender Leitungsfähigkeit sein. 4) Die Dachrinnen und alle Metallbeschläge an den Dächern oder Kaminen müssen durch dicke Drähte mit dem Hauptkonduktor verbunden werden. Das zweite und dritte dieser wesentlichen Erfordernisse können nicht genug beachtet werden. Ein Kupferstab von einem Quadratzentimeter Querschnitt würde wahrscheinlich einen zuverlässigen Konduktor bilden. Maxwell hat den Vorschlag gemacht, Häuser mit einem Netzwerk von leitenden Drähten zu bedecken, ohne jeden Hauptkonduktor, indem ihn der Gedanke leitete, dass alsdann das Innere des Gebäudes ebenso wie Faraday's Hohlwürfel (Art. 31) vollständig vor elektrischen Kräften geschützt wäre. Preece hat kürzlich berechnet, dass ein Blitzableiter von gegebener Höhe über der Bodenfläche einen Kegel vor der äussern Wirkung der Elektrizität beschützt, für welchen der Radius der Grundfläche gleich der Höhe des Stabes ist, dessen Seite jedoch in Gestalt eines Viertelkreisbogens eingeschnürt ist.

306. Atmosphärische Elektrizität. Im Jahre 1752 machte Lemonnier die Beobachtung, dass die Atmosphäre sich für gewöhnlich in einem elektrischen Zustande befindet. Cavallo, Beccaria, Ceca und andre machten weitere Entdeckungen auf diesem Gebiete und in jüngster Zeit haben Quetelet und Sir W. Thomson aus sorgfältigeren Beobachtungen allgemeinere Schlüsse gezogen. Das Hauptresultat ist, dass die Luft über

Digitized by Google

der Erdoberfläche gewöhnlich positiv elektrisch während guten Wetters ist, wenigstens in bezug auf die Erdoberfläche, da diese beziehungsweise negativ ist. Die sogenannten Messungen der »atmosphärischen Elektrizität« sind in Wirklichkeit Messungen der Potentialdifferenz zwischen einem Punkte der Erdoberfläche und einem bestimmten Punkte oberhalb derselben. In den oberen Regionen der Atmosphäre ist die Luft stark verdünnt, und leitet die Elektrizität wie die verdünnten Gase in den Geissler'schen Röhren (Art. 292). Die untere Luftschicht ist, wenn sie trocken ist, ein Nichtleiter. Von der oberen Luftschicht nimmt man an, dass sie mit + Elektrizität geladen ist, während die Erdoberfläche selbst — geladen ist, indem die dazwischen befindliche dichtere Luftschicht wie das Glas einer Leydener Flasche wirkt und die entgegengesetzten Ladungen getrennt hält. Wenn wir das elektrische Potential in verschiedenen Punkten innerhalb der Dicke des Glases einer Leydener Flasche messen könnten, so würden wir finden, dass die Werte des Potentials in regelmässiger Aufeinanderfolge von einem + Werte auf der einen Seite in einen — Wert auf der andern Seite übergingen, so dass in der Mitte sich ein Punkt vom Potential Null befindet. Nun gibt die Luft bei schönem Wetter immer + Angaben, und ihr Potential ist um so höher, je höher wir die Messung anstellen. Cavallo fand mehr Elektrizität in der Luft über der Kuppel der St. Pauls-Kirche, als an einer tiefern Stelle des Gebäudes. Sir W. Thomson fand, dass auf der Insel Arran bei einem Höhersteigen um einen Fuss das Potential von 23 auf 46 Volt stieg; doch war die Potentialdifferenz bisweilen für denselben Höhenunterschied 8 bis 10mal so gross und änderte sich schnell, sobald der Ostwind mit + oder — Elektrizität geladene Wolkenmassen am Himmel herantrieb. Joule und Thomson fanden, dass in Aberdeen das Potential um 40 Volt pro Fuss stieg, oder 1,3 Volt für einen Höhenunterschied von 1 cm.

Bei schönem Wetter ist eine — Elektrisierung der Luft äusserst selten. Beccaria beobachtete eine solche in 15 Jahren nur

Digitized by Google

6mal, und dann bei eintretenden Winden. Bei wechselnder Witterung jedoch und bei Regen ist die Luft öfter — als + und zeigt grosse Schwankungen vom Negativen zum Positiven und umgekehrt, mehrere Male in einer halben Stunde. Ein bestimmter Wechsel in dem elektrischen Zustande ist gewöhnlich von einem Witterungswechsel begleitet. »Hat der Regen aufgehört, sagte Ceca, und dauert ein bedeutender Ueberschuss (+) von Elektrizität an, so ist dies ein Zeichen, dass es mehrere Tage schönes Wetter bleibt.«

307. Methoden der Beobachtung. Die frühern Beobachter begnügten sich damit, an ein Elektroskop (mit Goldblättern oder Markkugeln) einen isolierten zugespitzten Stab zu befestigen, der sich oberhalb des Bodens in die Luft erstreckte, oder einen Drachen steigen zu lassen, oder, wie Becquerel, einen Pfeil in die Luft zu schiessen, der mit einem Elektroskope durch einen feinen Draht verbunden war, welcher entfernt wurde, bevor der Pfeil zur Erde fiel. Gay Lussac und Biot liessen von einem Luftballon einen Draht herab, und konstatierten eine Potentialdifferenz zwischen den obern und untern Luftschichten. Keine dieser Methoden ist vollkommen ausreichend, denn sie geben nicht das Potential für einen bestimmten einzelnen Punkt. Um die Spitze eines Stabes auf das Potential der umgebenden Luft zu bringen, ist es nötig, dass für kurze Zeit materielle Teilchen von jenem Punkte aus entladen werden, wobei jedes Teilchen bei seiner Lostrennung eine + oder — Ladung mit sich führt, bis die Potentiale zwischen dem Stabe und der Luft in jenem Punkte ausgeglichen sind. Volta that dies mit Hilfe einer kleinen Flamme am Ende eines Versuchsstabes. Sir W. Thomson wandte einen *„Wassertropf-Apparat"* an, einen isolierten Wasserbehälter, der mit einer in die Luft führenden Röhre versehen ist, aus welcher Tropfen hervordringen, um die Potentiale gleich zu machen; im Winter gebraucht er eine kleine Rolle von befeuchtetem Löschpapier. Dellmann benutzte eine andere Methode, indem er eine Kugel der Induktion durch die Luft aussetzte, dann isolierte und sie ins Haus brachte, um ihre

Digitized by Google

Ladung zu untersuchen. Peltier benutzte ein ähnliches Mittel, indem er auf dem Erdboden oder in seiner Nähe ein Elektrometer von der in Fig. 111 dargestellten Form aufstellte, wel-

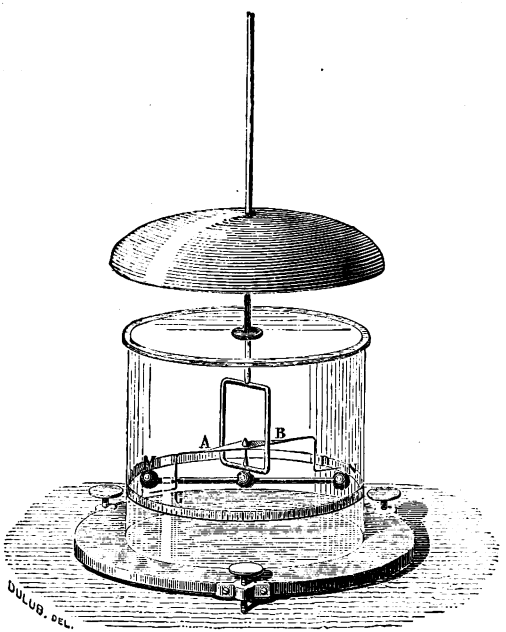

Fig. 111.

ches mit dem Erdboden verbunden, dann isoliert und hierauf behufs Untersuchung ins Haus geschafft wurde. Dieser Prozess lief in Wirklichkeit darauf hinaus, das Elektrometer *durch Induktion* mit der entgegengesetzten Elektrizität der Luft zu laden. Das Prinzip dieses besondern Elektrometers wurde in Art. 260 erklärt. In neuerer Zeit hat man zu Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität die genaueren Elektrometer des Sir W. Thomson in Anwendung gebracht, besonders das in Art. 262 beschriebene »Quadrant«-Elektrometer, das »Teilring«-Elektrometer und ein auf demselben Prinzipe beruhendes »tragbares« Elektrometer. Diese Elektrometer gewähren den doppelten Vorteil, quantitative Angaben zu gewähren und zum Selbstaufzeich-

Digitized by Google

nen geeignet zu sein, indem sie auf photographischem Wege die Bewegungen eines Lichtflecks verzeichnen, der von einem kleinen an ihrer Nadel angebrachten Spiegel reflektiert wird. Durch Anwendung eines *Wassertropfen*-Kollektors und eines Thomson-Elektrometers stellte Everett eine Reihe von Beobachtungen in Neu-Schottland an, und fand die höchste + Elektrisierung bei Frost und bei trockenem Winde, der die Luft mit Eisteilchen erfüllte.

308. Tägliche Aenderungen. Quetelet fand, dass in Brüssel die täglichen Angaben (bei schönem Wetter) zwei Maxima aufwiesen, welche im Sommer um 8 Uhr morgens und 9 Uhr abends, und im Winter um 10 Uhr morgens und 6 Uhr abends statt hatten, und 2 Minima, welche im Sommer um 3 Uhr nachmittags und um Mitternacht eintraten. Ebenso fand er, dass im Januar die Elektrizität ungefähr 13mal stärker war, als im Juni. Die von Prof. B. Stewart in Kew angestellten Beobachtungen zeigen ein Maximum um 8 Uhr vormittags im Sommer und um 10 Uhr vormittags im Winter, und ein zweites Minimum um 10 Uhr abends im Sommer und um 7 Uhr abends im Winter. Die Maxima entsprechen genau den Stunden des Temperaturwechsels, die Minima denen der konstanten Temperatur. In Paris findet Mascart nur ein Maximum ganz kurz vor Mitternacht; bei Sonnenaufgang nimmt die Elektrizität ab, bis gegen 3 Uhr nachmittags, wo dieselbe ein Minimum erreicht hat; von da nimmt sie wieder zu bis Einbruch der Nacht.

Unsere Kenntnis über diesen wichtigen Gegenstand ist noch sehr unvollkommen. Wir wissen noch nicht einmal, ob alle Aenderungen in der Elektrisierung der Erde gegenüber der Luft durch Ursachen hervorgerufen werden, welche oberhalb oder unterhalb der Erdoberfläche wirken. Gleichzeitige Beobachtungen an verschiedenen Plätzen und in verschiedenen Höhen sind unbedingt notwendig.

309. Das Nordlicht. In allen nördlichen Gegenden der Erde ist das Nordlicht (Aurora borealis) eine gewöhnliche Erscheinung; innerhalb der Arktischen Region und in ihrer Nähe

Digitized by Google

findet dasselbe fast jede Nacht statt. Aehnliche Lichterscheinungen bemerkt man in den südlichen Polargegenden der Erde, wo man sie *Aurora australis* nennt. In europäischen Breiten beobachtet, hat das Nordlicht gewöhnlich die Form einer Anzahl nicht scharf begrenzter Streifen oder Lichtströme von blasser Färbung (bisweilen mit rot und andern Farben vermischt), welche entweder fächerförmig vom Horizonte in der Richtung des (magnetischen) Nordens verlaufen, oder eine Art Bogen bilden, welcher sich über jenen Teil des Himmels erstreckt. Dies zeigt im allgemeinen Fig. 112. Häufig lässt sich in den Streifen

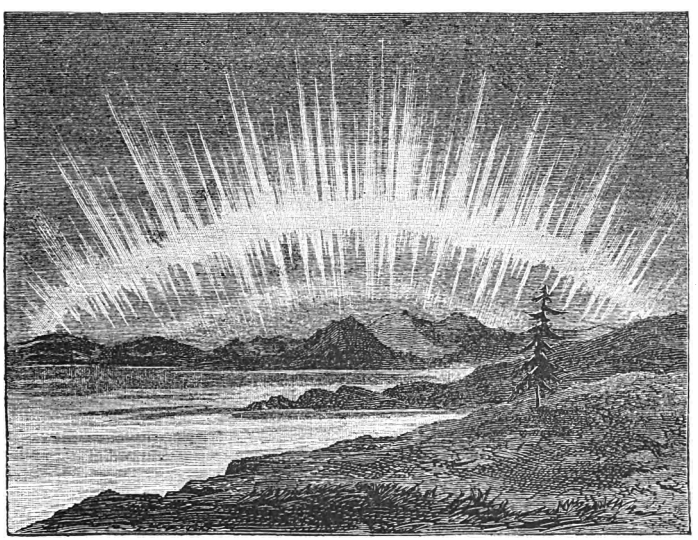

Fig. 112.

eine gewisse flackernde oder strömende Bewegung erkennen. Unter sehr günstigen Umständen dehnt sich das Nordlicht über den ganzen Himmel aus. Das Auftreten eines Nordlichts wird gewöhnlich von einem *magnetischen Sturme* (Art. 145) begleitet, welcher die Kompassnadeln über ganze Regionen des Erdballs affiziert. Dieser Umstand und die Lage der Bögen und Streifen des Nordlichts bezüglich des magnetischen Meridians weisen

Digitized by Google

direkt auf eine elektrische Quelle für dieses Licht hin, — eine Vermutung, welche durch die zahlreichen zwischen Nordlicht und den Erscheinungen der Entladung in verdünnter Luft (Art. 292 und 294) aufgefundenen Analogieen bestätigt wird. Doch wird, wenigstens in unserer Gegend, der elektrische Zustand der untern Schichten der Atmosphäre durch das Auftreten eines Nordlichts in keiner Weise beeinflusst. Am ersten September 1859 fand ein ungeheurer magnetischer Sturm statt, und Nordlichte sah man fast auf der ganzen Erde; zur selben Zeit fand ein bemerkenswerter Ausbruch von Energie in der Photosphäre der Sonne statt; jedoch konnte man eine gleichzeitige Entwicklung atmosphärischer Elektrizität nicht bemerken. In kürzerer Aufeinanderfolge erscheinen Nordlichte in Perioden von ungefähr $11\frac{1}{2}$ Jahren, was vortrefflich mit den Perioden des Maximums magnetischer Stürme (vergl. Art. 144) und der Sonnenflecke übereinstimmt.

Das Spektroskop zeigt, dass das Nordlicht von gasförmigen Körpern herrührt, da sein Spektrum aus mehreren hellen Linien besteht, welche sich mit Bestimmtheit auf keinen bekannten irdischen Stoff zurückführen lassen, welche jedoch im allgemeinen denjenigen Linien gleichen, welche man im Spektrum der elektrischen Entladung durch verdünnte trockene Luft erblickt.

Die aller Wahrscheinlichkeit nach richtige Theorie des Nordlichts ist diejenige, welche ursprünglich von Franklin herrührt, dass dasselbe nämlich eine Wirkung elekrischer Entladungen in der obern Luftschicht ist, infolge der verschiedenen elektrischen Zustände zwischen der kalten Luft der Polargegenden und den wärmeren Luft- und Dunstströmen, welche in tropischen Gegenden durch die Sonnenwärme vom Niveau des Ozeans aufsteigen. Denn Verdunstung von salzige Stoffe enthaltendem Wasser ist eine Quelle der Elektrizität (vergl. Art. 63), indem der entweichende Dunst + elektrisch wird.

Nach Nordenskiöld ist der Erdball an den Polen beständig von einem einfachen oder doppelten Lichtringe, resp. einer Licht-

Digitized by Google

krone, umgeben, welchen er »Nordlicht-Glanz« nennt. Die äussere Kante dieses Ringes schätzt er 120 Meilen über der Erdoberfläche und seinen Durchmesser auf circa 1250 Meilen. Der Mittelpunkt des Nordlicht-Glanzes fällt nicht genau mit dem magnetischen Pole zusammen, und liegt 81° nördlicher Breite und 80° östlicher Länge. Dieser Nordlichtglanz erscheint gewöhnlich als blasser Lichtbogen am Himmel und hat nicht die strahlenförmigen Streifen der Fig. 112, ausgenommen zur Zeit magnetischer Stürme oder solcher, die mit dem Nordlicht zusammenhängen.

Ein künstliches Nordlicht erzeugte Lemström, der auf einem Berge in Lapland ein Netzwerk von Drähten aufstellte, von denen viele Spitzen nach oben ausliefen. Indem er diesen Apparat isolierte und denselben durch einen Telegraphendraht mit einem Galvanometer am Fusse des Berges in Verbindung setzte, war er imstande, wirkliche elektrische Ströme zu beobachten, sobald der Nordlichtschein über dem Berge erschien.

Digitized by Google

KAPITEL V.

ELEKTROMAGNETISMUS.

XXV. VORLESUNG: *Theorie des magnetischen Potentials.*

310. Derjenige Abschnitt der Elektrizitätslehre, welcher von dem Zusammenhange zwischen Magnetismus und elektrischen Strömen handelt, heisst **Elektromagnetismus.** Im Art. 117 wurde das Gesetz der umgekehrten Quadrate in seiner Anwendung auf Magnete erläutert und die Erklärung für die Einheit des Magnetpols wurde in Art. 125 gegeben. Der Leser erfuhr auch, wie man die Stärke von Magnetpolen durch den Einheitspol ausdrücken kann und wie sich das Gesetz auf die Messung magnetischer Kräfte anwenden lässt. Zum Zwecke des Studiums ist es jedoch weit geeigneter, die Wirkung magnetischer und elektromagnetischer Systeme nicht durch die »Kraft«, sondern durch das »*Potential*« auszudrücken, d. h. durch ihre Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. In Art. 237 erfuhr der Leser, wie man das elektrische Potential, welches von einer elektrischen Masse herrührt, durch die Arbeit berechnen kann, welche verrichtet wird, wenn eine + elektrische Einheit als Versuchsladung aus unendlicher Entfernung herbeigeschafft wird. **Das magnetische Potential** lässt sich auf ähnliche Weise durch den idealen Vorgang berechnen, einen magnetischen Einheitspol (den nordsuchenden) aus unendlicher Entfernung herbeizuschaffen und den Betrag der hierbei verrichteten Arbeit zu berechnen. Folglich wird eine grosse Anzahl der Beziehungen, welche

Digitized by Google

in der 20. Vorlesung bezüglich des elektrischen Potentials bewiesen wurden, auch für das magnetische Potential richtig sein. Der Leser möge die folgenden Sätze mit den entsprechenden der Art. 237 bis 243 vergleichen:

a) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt ist die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um einen magnetischen Einheitspol (den nordsuchenden) aus unendlicher Entfernung nach jenem Punkte zu bewegen.*

b) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt, welches von einem Systeme von Magnetpolen herrührt, ist die Summe der einzeln magnetischen Potentiale, welche von den einzelnen Polen herrühren.*

Der Leser muss sich hier erinnern, dass die Potentiale, welche von nordsuchenden und südsuchenden Polen herrühren, von entgegengesetzten Vorzeichen sind, und dass letztere als negativ zu rechnen sind.

c) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt, welches von einem Systeme von Magnetpolen herrührt, lässt sich berechnen* (vergl. Art. 238), *indem man die Stärke der einzelnen Pole durch ihren Abstand von jenem Punkte dividiert und die erhaltenen Werte summiert.* Hat man z. B. die Pole von der Stärke m' m'' m''' ... mit den (Zentimeter) Abständen r' r'' r''' ... vom Punkte P, so gibt folgende Gleichung das Potential in P:

$$V_P = \frac{m'}{r'} + \frac{m''}{r''} + \frac{m'''}{r'''} + \ldots\ldots$$

oder $$V_P = \Sigma \frac{m}{r}.$$

d) *Die (magnetische) Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten ist die Arbeit, welche an oder von einem (nordsuchenden) Einheitspole verrichtet werden muss, um denselben von einem Punkte nach dem andern zu bewegen.*

e) *Magnetische Kraft ist die Aenderung des (magnetischen) Potentials pro Längeneinheit.*

f) *Oberflächen gleichen Potentials sind diejenigen (gedachten) Oberflächen, welche einen Magnetpol oder ein System von Polen um-*

Digitized by Google

geben, und für deren einzelne Punkte das (magnetische) Potential gleiche Werte hat. In der Umgebung eines einzigen Magnetpols z. B. würde unter der Voraussetzung, dass aller Magnetismus in einem Punkte in weiter Entfernung von allen andern Polen vereinigt wäre, das Potential ringsum in gleichen Abständen auch denselben Wert haben; und die Oberflächen gleichen Potentials würden ein System konzentrischer Kugeln sein, deren gegenseitiger Abstand so gross wäre, dass es eines Aufwandes von einem Erg bedürfte, um einen Einheitspol von einem Punkte einer Oberfläche nach einem beliebigen Punkte der nächstfolgenden Oberfläche zu bewegen (vergl. Fig. 97). Für jeden wirklichen Magnet mit 2 Polen würden die Oberflächen gleichen Potentials bedeutend komplizierter sein. *Die magnetische Kraft, ob anziehend oder abstossend, wirkt an den Oberflächen gleichen Potentials stets in einer zur Oberfläche senkrechten Richtung; die magnetischen Kraftlinien sind überall senkrecht zu den Oberflächen gleichen Potentials.*

311. Kraftröhren. Auch der folgende Satz ist von Wichtigkeit: Von einem einfachen Magnetpol (welcher weit von allen andern Polen entfernt gedacht wird) gehen die Kraftlinien strahlenförmig nach allen Richtungen. Den benachbarten Raum kann man sich auf diese Weise in eine Anzahl von kegelförmigen Körpern zerlegt denken, welche alle jenen Pol zur gemeinschaftlichen Spitze haben; und durch jeden Kegel gehen wie durch eine Röhre eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien. Ein solcher kegelförmiger Körper kann mit »Kraftröhre« bezeichnet werden. Wo man eine Kraftröhre auch durchschneidet, der Querschnitt geht durch alle eingeschlossenen Kraftlinien hindurch, obgleich dieselben immer mehr divergieren, je weiter die Röhre wird. Folglich:

g) *Die gesamte magnetische Kraft, welche an einem Querschnitte einer Kraftröhre ausgeübt wird, ist konstant, gleichviel, an welcher Stelle der Querschnitt genommen wird.*

Für den Fall, wo der Magnetismus nicht in einem einzigen Punkte konzentriert, sondern über eine Oberfläche verteilt ist,

Digitized by Google

haben wir eher von der »Menge des Magnetismus« als von der »Polstärke« zu sprechen, und für diesen Fall hat man:

h) *Magnetische Dichte ist die Menge des Magnetismus pro Flächeneinheit.* Für den Fall einer einfachen magnetischen Schale, über deren Oberfläche der Magnetismus in gleichförmiger Dichte verteilt ist, ist die »Stärke« der Schale gleich der Dicke derselben, multipliziert mit der Oberflächendichte.

312. Intensität des Feldes. Im Art. 105 haben wir gesehen, dass jeder Magnet von einem gewissen »Felde« umgeben ist, innerhalb dessen die magnetische Kraft wahrnehmbar ist. Wir können die Eigenschaften eines Feldes in irgend einem Punkte vollständig angeben, wenn wir die Stärke und die Richtung jener Kraft messen, d. h. wenn wir die **„Intensität des Feldes"** und die Richtung der Kraftlinien bestimmen. *Die »Intensität des Feldes« in einem Punkte wird gemessen durch die Kraft, mit welcher dasselbe auf einen in jenem Punkte befindlichen magnetischen Einheitspol wirkt. Folglich ist Einheit der Intensität des Feldes diejenige, welche auf einen Einheitspol mit der Krafteinheit wirkt.* Man hat also ein Feld von der Intensität 1 in einem Punkte, welcher einen Zentimeter vom Pole eines Magnets von der Stärke 1 entfernt ist. Angenommen, es befände sich ein Magnetpol von der Stärke m in einem Felde an einem Punkte, wo die Intensität den Wert H hat, so ist die Kraft m mal so gross, als wenn der Pol von der Stärke 1 wäre, und

$$f = m \times \mathrm{H}.$$

Als Maass für die Intensität des Feldes in einem Punkte können wir auch die Anzahl der Kraftlinien nehmen, welche durch ein Quadratzentimeter einer Oberfläche hindurchgehen, welche durch das Feld in jenem Punkte gelegt ist. Es folgt, *dass eine magnetische Poleinheit 4π Kraftlinien hat, welche von ihr ausgehen;* denn man hat die Einheit des Feldes in einem Abstande $= 1$; oder eine Kraftlinie pro Quadratzentimeter; und man hat 4π Quadratzentimeter Oberfläche auf einer Kugel, welche mit dem Radius 1 um den Pol gelegt ist. Ein Magnet, dessen Polstärke m, hat $4\pi m$ Kraftlinien, welche durch den Stahl führen und bei seinem Pole divergieren.

313. Intensität des Magnetisierens. Wird ein Stück eines magnetischen Metalls in ein magnetisches Feld gebracht, so gehen einige von den Kraftlinien durch dasselbe hindurch und magnetisieren es. Die Intensität seiner Magnetisierung hängt von der Intensität des Feldes ab, in welche es gebracht wurde, sowie von dem Metalle selbst. Von einem Metalle, in welchem wie im weichen Eisen auf diese Weise ein hoher Grad des

Digitized by Google

Magnetismus erzeugt wird, sagt man, es besitzt einen hohen **Magnetisierungs-Koeffizienten.** Jeder magnetische Körper hat einen positiven Magnetisierungs-Koeffizienten; aber es gibt viele Körper, z. B. Wismuth, Kupfer, Wasser etc., welche negative Magnetisierungs-Koeffizienten haben. Diese nennt man »diamagnetische« Körper (vergl. Art. 339). Körper mit hohem Magnetisierungs-Koeffizienten können als gute Leiter des Magnetismus angesehen werden. Wird ein Stück weiches Eisen in ein magnetisches Feld gebracht, so werden die Kraftlinien in jenem Raume zusammengedrängt und führen in grössern Mengen durch den jetzt vom Eisen eingenommenen Raum; wogegen in dem Falle, wo ein Stück Wismuth oder Kupfer in das Feld gebracht wird, nicht so viel Kraftlinien wie vorher durch den Raum führen, an welchem sich das diamagnetische Metall befindet. **Die Intensität der Magnetisierung** in der Substanz eines Magnets wird gemessen durch den Quotienten seines »magnetischen Moments« [1]) und seines Volumens. Ein permanenter Stahlmagnet hat eine bestimmte permanente Intensität der Magnetisierung; ein Stück weiches Eisen, welches sich in einem magnetischen Feld längs der Kraftlinien befindet, erhält eine gewisse temporäre Intensität der Magnetisierung, welche gleich dem Produkte der Intensität des Feldes H und des Magnetisierungs-Koeffizienten k des Eisens ist.

$$\text{Intensität des Magnetisierens} = \frac{\text{m . l}}{\text{Volumen}} = \text{k . H.}$$

Es stellt sich jedoch heraus, dass für jedes magnetische Metall ein bestimmtes Maximum der Intensität der Magnetisierung existiert, welches nicht überschritten werden kann, wie stark auch das Feld sein möge, in welchem sich das Metall befindet. Nach Rowland hat man folgende Maximalwerte für die Intensität verschiedener Metalle:

Eisen und Stahl 1390

---

1) Das »magnetische Moment« ist das Produkt der Polstärke und der Länge des Magnets, oder $= m \times l$.

Digitized by Google

Kobalt	800
Nickel	494.

Stahl behält nicht allen Magnetismus, welcher vorübergehend in demselben induziert werden kann, da sein permanentes Maximum der Intensität nur 785 beträgt [1]). Everett hat (aus Gauss'schen Beobachtungen) berechnet, dass die Intensität der Magnetisierung der Erde nur 0,0790 oder nur $\frac{1}{1760}$ von demjenigen Werte beträgt, der sich ergäbe, wenn der Erdball ganz aus Eisen bestände. Der Umstand, dass ein Maximum erreicht wird, zeigt, dass der Magnetisierungs-Koeffizient k nicht konstant ist, sondern dass derselbe um so kleiner ist, je höher der Grad der Magnetisierung. Ein Stück Nickel, welches in ein Feld mit geringer Intensität gebracht wird, wird ungefähr 5mal stärker magnetisiert, als ein Stück Eisen von derselben Grösse; in einem starken Felde jedoch würde das Eisen stärker magnetisiert werden. Ueber die Werte von k sind von Rowland und Stoletow Messungen in Feldern von verschiedener Intensität angestellt worden.

314. Das Potential, welches von einem (Solenoid-) Magnet herrührt. Ein langer dünner, gleichförmig magnetisierter Magnet zeigt nur an den beiden Enden freien Magnetismus und wirkt auf äussere Gegenstände genau so, als wenn 2 gleiche magnetische Mengen entgegengesetzter Art in jenen beiden Punkten angesammelt wären. Ein solcher Magnet wird bisweilen ein *Solenoid* genannt, um ihn von einer magnetischen *Schale* (Art. 107) zu unterscheiden. Gewöhnliche stab- und hufeisenförmige Magnete sind unvollkommene Solenoide. Das magnetische Potential, welches von einem Solenoid herrührt, und alle seine magnetischen Wirkungen hängen allein von der Lage seiner beiden Pole und von der Stärke derselben ab, nicht von der Gestalt des zwischen ihnen befindlichen Stabes, möge dieser gerade oder gekrümmt sein. In Art. 310 c. wurde

1) Nach Weber beträgt dasselbe 400; nach v. Waltenhoven 470; nach Schneebeli (in dünnen Drähten) 710 bis 1060.

Digitized by Google

die Regel angegeben, wie man das von einem Systeme von Polen herrührende Potential findet. Angenommen, die beiden Pole eines Solenoids wären von der Stärke $+m$ und $-m$ (wobei der südsuchende Pol negativ genommen ist), und die resp. Abstände dieser Pole von einem äussern Punkte P seien r_1 und r_2, dann ist das Potential im Punkte P:

$$V_P = m\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Angenommen, ein Magnet wäre so gebogen, dass seine beiden Pole einander berührten: dann wirkt derselbe auf einen äussern Gegenstand nicht als Magnet, und hat auch kein »Feld« (Art. 105); denn wenn die beiden Pole sich berühren, so sind ihre Abstände r_1 und r_2 von einem äussern Punkte P einander gleich und es ist

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 0.$$

315. Das Potential, welches von einer magnetischen Schale herrührt. Gauss wies nach, *dass das von einer magnetischen Schale herrührende Potential in einem Punkte ihrer Nachbarschaft gleich ist der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen der Punkt mit der Schale bildet;* wobei die Stärke einer magnetischen Schale das Produkt ihrer Dicke und ihrer magnetischen Oberflächen-Dichte ist.

Bedeutet ω den körperlichen Winkel, welchen der Punkt P mit der Schale bildet, und i die Stärke der Schale, so ist:

$$V_P = \omega \cdot i.$$

Beweis. Um diesen Satz zu beweisen, würde eine einfache Anwendung der Integralrechnung erforderlich sein. Doch muss an dieser Stelle folgender, allerdings unvollständiger, geometrischer Beweis genügen. Man denke sich die Schale in eine Anzahl kleiner Elemente von der Dicke t und der Grundfläche s zerlegt (Fig. 113). Der ganze körperliche Winkel, welchen der Punkt P mit der Schale bildet, möge ebenfalls in eine Anzahl kleiner Elementarkegel zerlegt werden, jeder mit dem körperlichen Winkel ω'; r_1 und r_2 mögen die Abstände der beiden Oberflächen des Elements

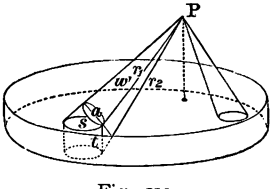

Fig. 113.

Digitized by Google

von P bedeuten. Durch den kleinen Kegel lege man senkrecht zu r_1 eine Ebene, und bezeichne mit a die Fläche des Querschnitts; der Winkel zwischen den Flächen s und a möge mit β bezeichnet werden, dann ist: $s = \frac{a}{\cos \beta}$. Ferner sei i die »Stärke« der Schale (d. h. ihre magnetische Oberflächendichte multipliziert mit ihrer Dicke), so ist $\frac{i}{t}$ die magnetische Oberflächendichte, und $s \cdot \frac{i}{t} = m$ die Polstärke des kleinen Magnets. Nun ist der körperliche Winkel

$$\omega' = \frac{\text{Fläche seines orthogonalen Querschnitts}}{r^2} = \frac{a}{r^2}$$

folglich $a = \omega' r^2$ und $s = \frac{\omega' r^2}{\cos \beta}$,

folglich $\omega' i \frac{r^2}{t \cos \beta} = m.$

Nun ist aber für den Punkt P das Potential des Magnets mit dem Pole m

$$v = m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$= \omega' i \frac{r^2}{t \cos \beta} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

und $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2}$, wofür wir auch $\frac{r_1 - r_2}{r^2}$ schreiben können, da wir den Unterschied zwischen r_1 und r_2 so klein machen können, wie wir wollen. Da ferner $r_1 - r_2 = t \cos \beta$, so hat man:

$$v = \omega' i \frac{r^2}{t \cos \beta} \cdot \frac{t \cos \beta}{r^2}$$

oder $v = \omega' i$

d. h. das Potential, welches von einem Elemente der Schale herrührt, ist gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen der Punkt P mit dem Elemente bildet. Bezeichnet daher V die Summe aller Werte von v für alle Elemente, und ω den ganzen körperlichen Winkel (die Summe aller kleinen körperlichen Winkel ω'), so ist

$$V_P = \omega \cdot i$$

d. h. für jeden Punkt ist das Potential, welches von einer magnetischen Schale herrührt, gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen jener Punkt mit der ganzen Schale bildet.

Daher stellt ωi die Arbeit dar, welche von oder an einem Einheitspole verrichtet werden müsste, um denselben aus unendlicher Entfernung nach dem Punkte P zu bewegen, mit welchem die Schale den körperlichen Winkel ω bildet. Im Punkte

Digitized by Google

Q, für welchen der Winkel der Schale einen andern Wert hat, würde das Potential ebenfalls einen andern Wert haben, so dass die Potentialdifferenz zwischen P und Q

$$V_Q - V_P = i\,(\omega_Q - \omega_P)$$

wäre. Würde ein Magnetpol von der Stärke m nach P bewegt, so würde die Arbeit m mal zu verrichten sein, oder das gemeinschaftliche Potential würde $= m \,.\, \omega \,.\, i$ sein.

316. Potential eines Magnetpols auf eine Schale. Wenn die Schale von der Stärke i an die Stelle geschafft werden soll, wo sie mit dem Pole m einen körperlichen Winkel ω bildet, so erfordert dies offenbar denselben Aufwand an Arbeit, als wenn der Magnetpol aus unendlicher Entfernung heranbewegt werden soll; folglich stellt $m \,.\, \omega \,.\, i$ sowohl das Potential des Poles auf die Schale dar, als auch das Potential der Schale auf den Pol. Nun können die von einem Pole ausgehenden Kraftlinien ihrer Zahl nach der Stärke dieses Poles proportional gesetzt werden, und von einem einfachen Pole würden sie strahlenförmig nach allen Richtungen auslaufen. Wenn wir daher im Punkte P, dem Scheitel des körperlichen Winkels eines Kegel, einen Magnetpol hätten, so würde die Zahl der Kraftlinien, welche innerhalb des körperlichen Winkels lägen, diesem proportional sein. Daher ist es zweckmässig, $m \,.\, \omega$ als Ausdruck für die Zahl der Kraftlinien des Poles zu nehmen, welche durch die Schale führen, und wir können die auf diese Weise begrenzte Zahl mit N bezeichnen. Mithin der Satz: *Das Potential eines Magnetpols auf eine magnetische Schale ist gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit der Anzahl der (von dem Magnetpole herrührenden) Kraftlinien, welche durch die Schale führen,* oder $V = N \,.\, i$. Würde die Schale oder der Pol nach einem Punkte bewegt, wo eine andere Zahl von Kraftlinien geschnitten würden, so würde die Potentialdifferenz zwischen den beiden Punkten dargestellt durch

$$V_Q - V_P = \pm\, i\,(N_Q - N_P).$$

Diese Formel ist sehr wichtig; doch muss der Leser noch besonders auf die Vorzeichen aufmerksam gemacht werden, welche

Digitized by Google

bei Anwendungen der Formel auf verschiedene Grössen zu gebrauchen sind. Ein Magnet hat zwei Pole (einen nordsuchenden und einen südsuchenden), deren Stärke $+ m$ und $- m$ ist, und die beiden Oberflächen einer magnetischen Schale haben ebenfalls entgegengesetzte Zeichen. Um einen nordsuchenden (oder positiven) Pol der abstossenden Kraft der nordsuchenden Fläche einer Schale entgegen zu bewegen, ist ein + Betrag von zu verrichtender Arbeit erforderlich; und ihre gegenseitige Wirkung würde es möglich machen, dass nachher kraft ihrer Lage Arbeit verrichtet würde; in diesem Falle ist dann das Potential positiv. Um dagegen einen nordsuchenden Pol der südsuchenden Fläche einer Schale entgegen zu bewegen, muss der Pol Arbeit verrichten, denn dieser wird angezogen; und da die vom Pole verrichtete Arbeit so aufgefasst werden kann, als ob wir eine *negative* Arbeit verrichteten, so hat das Potential hier einen negativen Wert.

Nehmen wir ferner an, wir könnten einen nordsuchenden Einheitspol der abstossenden Kraft der nordsuchenden Fläche einer Schale von der Stärke i entgegen bewegen bis ganz auf die Fläche der Schale, dann würde die Schale die Hälfte des ganzen Raumes um den Pol herum einnehmen, und der körperliche Winkel zwischen Schale und Pol betrüge also 2π [1]), das Potential also $+ 2\pi . i$. Hätten wir die südsuchende Fläche genommen, so hätte das Potential an dieser Fläche den Wert $- 2\pi i$ gehabt. Daraus geht hervor, *dass das Potential sich um die Grösse $4\pi i$ ändert, wenn man von einer Seite der Schale zur andern übergeht.*

317. Wirkung zwischen einem Pole und einer magnetischen Schale. Die Fig. 52 und 53 lassen erkennen, dass Kraftlinien von zwei Polen entgegengesetzter Art in ein ander übergehen, während diejenigen von gleichnamigen Polen sich seitwärts krümmen, als wenn sie sich gegenseitig abstiessen. Wenn ein nordsuchender Pol der nordsuchenden Fläche einer

1) Vergl. die Anmerkung über Winkelberechnung. Art. 133.

Digitized by Google

Schale genähert wird, so führen wenige oder gar keine Kraftlinien des Magnets durch die Schale; wogegen in dem Falle, wo ein nordsuchender Pol der südsuchenden Fläche einer Schale genähert wird, eine grosse Anzahl der Linien die Schale treffen, und der Pol thatsächlich von der Schale angezogen wird, wo dann möglichst viele Kraftlinien von der Schale geschnitten werden. Diese Wirkung können wir in Worten so ausdrücken: *Eine magnetische Schale und ein Magnetpol wirken gegenseitig auf einander und nehmen eine solche Lage an, dass die Zahl der von der Schale geschnittenen Kraftlinien ein Maximum wird* (Maxwell's Regel, Art. 193). Ausserhalb der anziehenden Fläche der Schale ist das Potential $-\omega i$, und der Pol bewegt sich so, dass diese negative Grösse möglichst gross, das Potential also ein Minimum wird. Dies ist nur eine andere Ausdrucksweise für den besonderen Fall des allgemeinen Satzes, dass Körper sich so zu bewegen streben, dass die Energie, welche sie kraft ihrer Lage besitzen, zu einem Minimum herabsinkt.

318. Magnetisches Potential, welches von einem Strome herrührt. Die magnetische Schalen betreffenden Sätze, welche in den vorhergehenden Paragraphen angegeben sind, sind aus dem im Art. 192 angeführten Grunde so wichtig, dass nämlich ein Schliessungsbogen, der von einem elektrischen Strome durchflossen wird, sich wie eine magnetische Schale verhält. Und um bei der Anwendung dieser Sätze die magnetischen Wirkungen der Ströme zu berechnen, müssen wir uns der in Art. 196 erklärten elektromagnetischen Einheit der Stromstärke bedienen. Bei Zugrundelegung dieser Einheit können wir sogleich auf Art. 315 zurückgehen und die Sätze über magnetische Schalen auf geschlossene Volta'sche Schliessungsbögen übertragen.

a) **Potential eines geschlossenen Stromkreises** (vgl. Art. 315).

Das Potential V eines geschlossenen Volta'schen Stromkreises in bezug auf einen benachbarten Punkt ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit dem körperlichen Winkel ω, welchen der Punkt mit

Digitized by Google

dem Stromkreise bildet. Ist i die Stromstärke in elektromagnetischen Einheiten, so ist

$$V_P = -\omega i.$$

Die Wahl des negativen Vorzeichens lässt sich wie folgt begründen: Das Potential (d. h. die an einem nordsuchenden Einheitspole verrichtete Arbeit) wird positiv gerechnet in dem Falle, wo die Arbeit gegen eine abstossende Kraft geleistet wird. Soll nun ein nordsuchender Pol nach einem Punkte bewegt werden, welcher der abstossenden Fläche eines Schliessungsbogens gegenüberliegt, so muss derselbe (vergl. Fig. 115) nach jener Fläche gebracht werden, um welche die Elektrizität strömt, in der entgegengesetzten Bewegungsrichtung des Uhrzeigers oder in der negativen Richtung, das heisst, man muss annehmen, der um die Fläche fliessende Strom wäre von der Stärke $-i$. Der Leser kann sich leichter über diese Vereinbarung betreffs der Vorzeichen orientieren, wenn er beachtet, dass er beim Anschauen des Südpols eines Elektromagnets in der positiven Richtung der magnetischen Kraftlinien sieht, und dass der Strom um die Rolle in der Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers fliesst (vergl. Fig. 115). Oder die + Richtung der Kraftlinien, welche durch den Schliessungsbogen führen, stimmt mit einer (+) Drehung um denselben überein, wie das Eindringen einer gewöhnlichen rechts gewundenen Schraube mit der Drehung nach rechts übereinstimmt.

b) In einem Punkte Q, wo der körperliche Winkel des Schliessungsbogens den Wert ω_Q statt ω_P hat, hat auch das Potential einen andern Wert und die Potentialdifferenz ist

$$V_Q - V_P = -i(\omega_Q - \omega_P).$$

319. c) **Potential zwischen einem Magnetpol und einem Stromkreis.** Würde man einen Magnetpol von der Stärke m aus unendlicher Entfernung bis nach einem Punkte P bewegen, welcher mit dem Stromkreise den körperlichen Winkel ω bildet, den vom Strome ausgeübten magnetischen Kräften entgegen, so wäre m mal so viel Arbeit verrichtet, als wenn der Magnetpol von der Stärke 1 gewesen wäre, und die Arbeit würde die nämliche sein, ob der Pol m nach dem Stromkreise oder der Stromkreis nach dem Pole hin bewegt würde. Folglich ist ihr Potential

$$-m \cdot \omega \cdot i.$$

Da wir jedoch, wie in Art. 316, $m \cdot \omega$ als die Anzahl der Kraftlinien des Poles ansehen können, welche vom Stromkreise ge-

Digitized by Google

schnitten werden und durch denselben hindurchgehen, so können wir für jene Zahl N setzen und schreiben

$$V = - iN$$

oder *das Potential zwischen einem Magnetpole und einem Stromkreise ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit der Anzahl der Kraftlinien des Magnetpols, welche vom Stromkreise geschnitten werden.* (Das Ganze mit negativem Zeichen genommen.)

d) Wie für den Fall der magnetischen Schale, so ändert sich auch beim Stromkreise der Wert des Potentials um $4\pi i$, wenn man von einem Punkte auf der einen Seite desselben zu einem Punkte auf der andern Seite übergeht; d. h. auf der einen Seite ist das Potential $- 2\pi i$, und auf der andern $+ 2\pi i$, folglich muss eine Arbeit $= 4\pi i$ verrichtet werden, um einen Einheitspol von der einen Seite auf die entgegengesetzte um die Aussenseite des Stromkreises herum zu bewegen. Die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man den Schliessungsdraht in n Windungen schlingt, würde $4n\pi i$ betragen.

320. e) **Potential zweier Ströme auf einander.** Zwei geschlossene Ströme haben ein Potential, welches von ihrer Stärke, ihrem gegenseitigen Abstande, von ihrer Form und ihrer Lage abhängt. Sind die Stromstärken i und i', der Abstand zwischen zwei Elementen ds und ds' der Leitungsdrähte r und ε der Winkel, welchen die Elemente mit einander bilden, so lässt sich nachweisen, dass ihr Potential $= - ii' \int\int \frac{\cos \varepsilon}{r} ds\, ds'$. Dieser Ausdruck stellt die Arbeit dar, welche verrichtet werden müsste, um einen der beiden Stromkreise aus unendlicher Entfernung in die betreffende Lage in der Nähe des andern zu bewegen, und ist eine negative Grösse, wenn sie sich anziehen. Nehmen wir nun an, die Stromstärke wäre in jedem Schliessungsdrahte gleich der Einheit, so ist ihr Potential in diesem Falle $\int\int \frac{\cos \varepsilon}{r} ds\, ds'$, eine Grösse, welche nur von der geometrischen Gestalt und Lage der Schliessungsdrähte abhängt, und welche wir mit dem Symbole M bezeich-

Digitized by Google

nen wollen, dem *„Koeffizienten des Potentials“*, oder *„Induktions-Koeffizienten“*. Wir können dann das Potential beider Ströme i und i' ausdrücken durch $-ii'$ M.

Nun haben wir aber in dem Falle eines einzigen Stromes gesehen, dass wir das Potential zwischen einem Strome und einem Einheitspole darstellen können als das Produkt der Stromstärke $-i$, multipliziert mit der Anzahl N der Kraftlinien des Magnetpols, welche von dem Strome geschnitten werden. Daher muss das Symbol M die Anzahl der beiderseitigen Kraftlinien bedeuten, welche von beiden Strömen geschnitten werden, falls die Ströme von der Stärke 1 wären. Nennen wir die beiden Ströme A und B, und sind dieselben von der Stärke 1, so schneidet A M Kraftlinien von B und B schneidet M Kraftlinien von A.

Nehmen wir nun ferner an, dass beide Ströme in derselben Richtung (in der des Uhrzeigers) fliessen; die Vorderseite oder südsuchende Fläche des einen Stromes befindet sich dann der Rückseite oder nordsuchenden Fläche des andern Stromes gegenüber, dieselben ziehen sich also an und verrichten thatsächlich Arbeit, indem sie sich einander nähern, oder (wie das negative Vorzeichen zeigt), es wird eine negative Arbeit verrichtet, indem der eine Strom dem andern genähert wird. Haben sie sich so weit wie möglich angezogen, so fallen die Schliessungsdrähte der Richtung und Lage nach, so viel wie überhaupt möglich, zusammen. Ihre potentielle Energie hat ihr tiefstes Minimum erreicht, indem ihr Potential ein negatives Maximum ist und ihr Induktions-Koefficient M seinen grösstmöglichen Wert hat. *Zwei Ströme stellen sich daher so, dass ihr Potentialkoeffizient oder Induktionskoeffizient M den grösstmöglichen Wert erhält.* Dies rechtfertigt Maxwell's Regel (Art. 193), da M die Anzahl der Kraftlinien bedeutet, welche von beiden Strömen geschnitten werden. Und da in dieser Lage jeder Strom möglichst viele magnetische Kraftlinien durch den andern induziert, so wird der *Potential-Koeffizient* auch *Induktions-Koeffizient* genannt.

Digitized by Google

Anmerkung über magnetische und elektromagnetische Einheiten.

321. Magnetische Einheiten. Alle magnetischen Grössen, Polstärke, Intensität der Magnetisierung etc. werden mit Hilfe besonderer Einheiten ausgedrückt, welche aus den Fundamentaleinheiten der Länge, der Masse und der Zeit abgeleitet werden. Diese letzteren sind in der Anmerkung über fundamentale und abgeleitete Einheiten erklärt (Art. 254). Die meisten der folgenden Einheiten wurden unmittelbar in der vorhergehenden oder in der XI. Vorlesung erklärt; aus ihnen folgen die übrigen.

Einheitsstärke des Magnetpols. Der magnetische Einheitspol ist derjenige, welcher einen gleichnamigen Pol von derselben Stärke in dem Abstände von einem Zentimeter mit der Krafteinheit abstösst. (Art. 125).

Magnetisches Potential. Da das magnetische Potential durch die Arbeit gemessen wird, welche verrichtet wird, wenn man einen magnetischen Einheitspol gegen die magnetischen Kräfte bewegt, so wird die Einheit des magnetischen Potentials durch die Arbeitseinheit, das Erg, gemessen.

Einheit der magnetischen Potentialdifferenz. Diese findet statt zwischen 2 Punkten, wenn es eines Arbeitsaufwandes von einem Erg bedarf, um einen (nordsuchenden) Einheitspol von einem Punkte nach einem andern, den magnetischen Kräften entgegen, zu bewegen.

Intensität des magnetischen Feldes. Dieselbe wird durch die Kraft gemessen, welche das Feld auf einen magnetischen Einheitspol ausübt. Daher ist

Einheit der Intensität des Feldes diejenige, welche auf einen (nordsuchenden) Einheitspol die Krafteinheit ausübt.

322. Elektromagnetische Einheiten. Die vorhergehenden magnetischen Einheiten führen zu der folgenden Reihe von elektrischen Einheiten, bei denen die Stromstärke etc. in magnetischem Maasse ausgedrückt sind. Das Verhältnis dieser »elektromagnetischen« Einheiten zu den »elektrostatischen« des Art. 257 wird im Art. 365 erklärt.

Einheit der Stromstärke. Ein Strom hat die Stärke eins, wenn ein Zentimeter Drahtlänge, zum Kreisbogen von einem Zentimer Radius gebogen, auf einen im Mittelpunkte befindlichen magnetischen Einheitspol eine Krafteinheit ausübt. (Art. 196.)

Einheit der Elektrizitätsmenge ist diejenige Menge, welche in einem Einheitsstrome in einer Sekunde fortbewegt wird.

Einheit der Potentialdifferenz (oder der *elektromotorischen Kraft).* Potential ist Arbeit, welche an einer elektrischen Einheit verrichtet wird, deshalb findet die Einheit der Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten statt, wenn

Digitized by Google

eine Arbeitseinheit verbraucht wird, um eine Einheit positiver Elektrizität von einem Punkte nach dem andern, der elektrischen Kraft entgegen, zu bewegen.

Einheit des Widerstandes. Ein Konduktor besitzt den Widerstand eins, wenn die Einheit der Potentialdifferenz zwischen seinen Enden bewirkt, dass ein Strom von der Stärke eins (d. h. eine Masseneinheit pro Sekunde) durch ihn hindurchfliesst.

323. Praktische Einheiten. Mehrere der obigen »absoluten« Einheiten würden bei praktischen Anwendungen ungebührlich gross und andere ungebührlich klein ausfallen. Deshalb hat man sie durch folgende ersetzt:

Elektromotorische Kraft. **Das Volt** $= 10^8$ absoluten Einheiten (etwas weniger als die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes).

Widerstand. **Das Ohm** $= 10^9$ absoluten Einheiten des Widerstandes (theoretisch der Widerstand, den die Geschwindigkeit eines Erdquadranten pro Sekunde bietet). Vergl. Art. 364.

Stromstärke. Als praktische Einheit der Stromstärke wird diejenige genommen, welche ein Potential von einem *Volt* bei einem Widerstande von einem *Ohm* liefert, d. h. 10^{-1} von einer absoluten (elektromagnetischen) Einheit. Dieselbe heisst das **Ampère** (früher das »Weber«).

Einheit der Elektrizität. Das **Coulomb** $= 10^{-1}$ absolute Mengeneinheiten des elektromagnetischen Systems.

Kapazität. Das **Farad** $= 10^{-9}$ (oder ein tausendmilliontel) von einer absoluten Einheit der Kapazität. Da es sich jedoch herausstellte, dass Elektriker Grössen zu messen hatten, welche millionenmal grösser oder kleiner sind, so benutzt man bisweilen die Vorsilben mega- und micro-, um das millionenfache resp. den millionten Teil zu bezeichnen. So ist z. B. ein Megohm ein Widerstand von einer Million Ohm, ein Mikrofarad eine Kapazität von $\frac{1}{1{,}000{,}000}$ Farad etc. Die Vorsilbe milli- wendet man häufig für den tausendsten Teil an; so ist ein Milli-Ampère der tausendste Teil eines Ampère.

Dieses System praktischer Einheiten [1]) wurde von einem Komitee der British Association aufgestellt, welches auch den Wert des Ohms durch den Versuch ermittelte und Normal-Widerstandsrollen aus Argentan konstruierte, welche »B. A. Einheiten« oder »Ohm« genannt wurden. Das »praktische«

---

1) Anm. des Uebersetzers: Die vorstehend definierten Einheiten des Ohm, Volt, Ampère, Coulomb und Farad sind seit ihrer Festsetzung durch den internationalen Kongress der Elektriker zu Paris 1881 allgemein angenommen worden. Daselbst ist auch das Verhältnis des Ohm zu der Siemens'schen Widerstandseinheit (Widerstand einer Quecksilbersäule von 19 mm Querschnitt und 1 m Länge) für praktische Zwecke festgestellt, nämlich 1 Ohm = 1,06 S. E.

Digitized by Google

System kann man als ein System von Einheiten betrachten, welche nicht aus den fundamentalen Einheiten: Zentimeter, Gramm, Sekunde, abgeleitet sind, sondern aus einem Systeme, bei welchem die Längeneinheit und die Masseneinheit der Erdquadrant resp. 10^{-11} Gramm sind, die Sekunde dagegen als Zeiteinheit beibehalten ist.

324. Dimensionen der magnetischen und elektromagnetischen Einheiten. Der Fundamentalbegriff der »Dimension« ist in Art. 258 erklärt. Eine leichte Ueberlegung wird den Leser in den Stand setzen, folgende Tabelle selbständig abzuleiten:

	Einheiten.	Dimensionen.
	Magnetische:	
m	Polstärke / Menge des Magnetismus $\} = \sqrt{\text{Kraft} \times (\text{Abstand})^2} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$
V	Magnetisches Potential $= \frac{\text{Arbeit}}{\text{Polstärke}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
H	Intensität des Feldes $= \frac{\text{Kraft}}{\text{Polstärke}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$
	Elektromagnetische:	
i	Strom (Stärke) = Intensität des Feldes × Länge =	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
Q	Menge = Strom × Zeit =	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$
V / E	Potential / Elektromotorische Kraft $\} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Menge}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$
R	Widerstand $= \frac{\text{E.M.K.}}{\text{Strom}} =$	$L T^{-1}$
C	Kapazität $= \frac{\text{Menge}}{\text{Potential}} =$	$L^{-1} T^{2}$

Anmerkung über die Messung der erdmagnetischen Kraft in absoluten Einheiten.

325 a. Die Intensität der erdmagnetischen Kraft an einem Orte ist die Kraft, mit welcher ein Magnetpol von der Stärke 1 angezogen wird. Wie im Art. 138 ausgeführt wurde, ist es üblich, die horizontale Komponente H dieser Kraft zu messen, und hieraus, sowie aus dem cosinus des Inklinationswinkels die totale Kraft I zu berechnen, da die direkte Bestimmung der totalen Kraft Schwierigkeiten bietet. Um H in absoluten (oder C.G.S.) Ein-

Digitized by Google

heiten zu bestimmen, sind zwei Beobachtungen an einem Magnete vom magnetischen Moment M erforderlich; (das magnetische Moment ist, wie in Art. 313 erwähnt wurde, das Produkt seiner Länge multipliziert mit der Stärke eines Poles). Bei der einen dieser Beobachtungen wird das Produkt MH durch eine *Methode der Schwingungen* bestimmt; bei der zweiten wird der Quotient $\frac{M}{H}$ durch eine besondere *Methode der Ablenkung* bestimmt; Dann ergibt sich H als Qadratwurzel aus der Zahl, welche man erhält, wenn man MH durch $\frac{M}{H}$ dividiert.

1) Bestimmung von MH. — Die Zeit t einer vollständigen Schwingung (Hin- und Herbewegung) eines Magnetstabes ist

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{K}{HM}},$$

wo K das »Trägheitsmoment« des Magnets bedeutet. Diese Formel gilt jedoch nur für sehr kleine Oszillationen. Durch algebraische Transformation folgt:

$$HM = \frac{4\pi^2 K}{t^2}.$$

Von diesen Grössen bestimmt man t durch eine direkte Beobachtung der Schwingungszeit eines an einen torsionslosen Faden aufgehängten Magnets; und K kann entweder durch den Versuch bestimmt werden oder nach einer der folgenden Formeln:

Für einen runden Stab ist $K = w\left(\frac{l^2}{12} + \frac{a^2}{4}\right)$;

für einen rechteckförmigen Stab ist $K = \frac{1}{12} w (l^2 + b^2)$.

Hier bedeutet w die Masse des Stabes in Grammen, l seine Länge, a seinen Radius (falls der Stab rund), b seine horizontal gemessene Breite (falls derselbe von rechteckigem Querschnitt).

2) Bestimmung von $\frac{M}{H}$. Darauf wird durch den Magnet eine kleine Magnetnadel abgelenkt, und zwar so, dass seine Breitseite dabei derselben zugewandt ist. Der Magnet wird horizontal und rechtwinklig zum magnetischen Meridian aufgestellt, so dass sein Mittelpunkt genau der (magnetische) Süden resp. Norden der kleinen Nadel ist und von ihrem Mittelpunkte den Abstand r hat. In dieser Lage wird der Nordpol der Nadel vom Nordpol des Magnets abgestossen, vom Südpol desselben angezogen, während der Südpol der Nadel entgegengesetzte Wirkungen erfährt. Die vollständige Wirkung des Magnets auf die Nadel ist eine Ablenkung der letztern um einen Winkel δ, dessen Tangente dem Quotienten $\frac{M}{H}$ direkt proportional ist

Digitized by Google

und umgekehrt proportional dem Kubus des Abstandes r; d. h.

$$\frac{M}{H} = r^3 \tan \delta.$$

Durch Division von MH durch $\frac{M}{H}$ ergibt sich

$$H^2 = \frac{4\pi^2 K}{t^2 r^3 \tan \delta}$$

folglich

$$H = \frac{2\pi}{t}\sqrt{\frac{K}{r^3 \tan \delta}}.$$

Anmerkung über Indexbezeichnung.

325 b. Der Umstand, dass die Elektriker mit Grössen zu thun haben, welche teils durch sehr grosse, teils durch sehr kleine Zahlen auszudrücken sind, war die Veranlassung, dass ein System der Indexbezeichnung eingeführt wurde, um der Anwendung langer Ziffernreihen überhoben zu sein. In diesem Systeme werden nur die Hauptziffern einer Grösse niedergeschrieben, während die Endziffern, oder im Falle eines langen Dezimalbruchs, die Anfangsziffern durch einen darüber geschriebenen Index angedeutet werden. Demgemäss lässt sich die Zahl $1000 = 10 \times 10 \times 10$ durch 10^3 und die Zahl 42,000 durch 42×10^3 wiedergeben; die brittischen Nationalschulden im Betrage von 770,000,000 £ durch 77×10^7. Brüche haben negative Indices, wenn dieselben als Exponenten geschrieben werden. So ist $\frac{1}{100} = 0{,}01 = 10^{-2}$ und $0{,}00028 = 28 \times 10^{-5}$. Der Nutzen dieser Schreibweise soll an einigen Beispielen über Elektrizität gezeigt werden. Die elektrostatische Kapazität der Erde ist 630,000,000 mal grösser als diejenige einer Kugel von einem Zentimeter Radius, $= 63 \times 10^7$ (elektrostatischen) Einheiten. Das magnetische Moment der Erde beträgt nach Gauss das 85,000,000,000,000,000,000,000,000fache eines Magnets von der Stärke 1 und der Länge von einem Zentimeter, d. h. ihr magnetisches Moment beträgt 85×10^{24} Einheiten. Der Widerstand des Selens ist ungefähr 40,000,000,000 oder 4×10^{10}mal grösser als derjenige des Kupfers; derjenige der Luft ist ungefähr 10^{26}mal grösser oder

100,000,000,000,000,000,000,000,000mal.

Die Geschwindigkeit des Lichts beträgt ungefähr 30,000,000,000 Zentimeter pro Sekunde oder 3×10^{10}. Als letztes Beispiel können wir anführen, dass die Anzahl der Atome des Weltalls, bis zum nächsten Fixstern, jedenfalls weniger als 7×10^{91} beträgt.

Digitized by Google

XXVI. VORLESUNG: *Elektromagnete.*

326. Elektromagnete. Unmittelbar nach Oerstedt's Entdeckung der Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel, fanden im Jahre 1820 Arago und Davy unabhängig von einander eine Methode, Eisen und Stahl dadurch zu magnetisieren, dass man elektrische Ströme in spiralförmig um dieselben gewundenen Drahtrollen fliessen lässt. Diese Methode wird durch Fig. 114 veranschaulicht, wo der Strom eines ein-

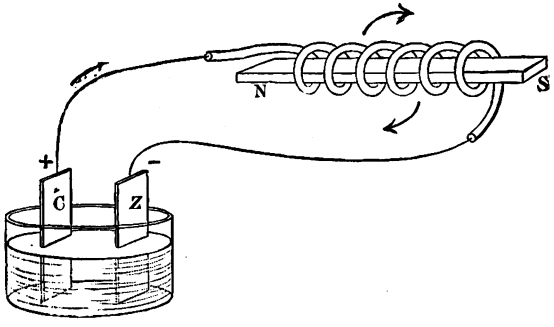

Fig. 114.

fachen Elementes durch eine spiralförmig gewundene Drahtrolle fliesst, in deren Hohlraume sich ein Eisen- oder Stahlstab befindet, welcher hierdurch magnetisiert wird. Die einzelnen Windungen der Rolle dürfen einander und den von ihnen umgebenen Stab nicht berühren, denn sonst würde der Strom den kürzesten der ihm gebotenen Wege nehmen und nicht alle Windungen der Rolle durchkreisen. Um diesen durch Berührung veranlassten kurzen Weg des Stromes zu verhüten, muss der Draht der Rolle mit Seide oder Baumwolle übersponnen (im letzteren Falle wird die Isolierung dadurch noch vollständiger, dass man die Baumwolle in geschmolzenes Paraffin taucht) oder auch mit einer Schicht Guttapercha überzogen werden. Ist der Stab von Eisen, so ist derselbe nur so lange Magnet, als der Strom fliesst; und ein Eisenstab, welcher auf diese

Digitized by Google

Weise von einer Drahtrolle umgeben ist, um denselben durch einen elektrischen Strom zu magnetisieren, heisst ein **Elektromagnet.** Diese Bezeichnung rührt von Sturgeon her, welcher die Entdeckung Davy's und Arago's zur Anfertigung von Elektromagneten benutzte, welche viel kräftiger waren als alle bislang verfertigten Magnete.

Mit Hilfe der Ampère'schen Regel (Art. 186) können wir bestimmen, welches Ende eines Elektromagnets der nordsuchende Pol sein wird; denn denken wir unseren eigenen Körper im Strome schwimmen (Fig. 114), mit dem Gesichte nach dem Stabe gerichtet, so befindet sich der nordsuchende Pol zur Linken. Es ist gut, sich diese Lage an folgenden Regeln zu merken: — *Sieht man auf den südsuchenden Pol eines Elektromagnets, so zirkulieren die magnetisierenden Ströme in derselben Richtung, wie sich die Zeiger einer Uhr bewegen; und sieht man auf den nordsuchenden Pol eines Elektromagnets, so zirkulieren die magnetisierenden Ströme in der entgegengesetzten Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers.* Fig. 115 macht dies anschaulich. Diese Regeln gelten stets, gleichviel ob die Drahtwindungen bei dem dem Beobachter zugewandten oder abgewandten Ende anfangen, d. h. gleichviel, ob die Spirale rechts oder, wie in Fig. 114, links gewunden ist. In anbetracht der magnetisierenden Kraft ist es ganz egal, ob die Windungen der Rolle an dem einen Ende anfangen und nach dem andern führen und zum Ausgangspunkte wieder zurück, oder ob sie in der Mitte des Stabes anfangen und von dort zu dem einen Ende desselben führen und dann zum andern; man muss nur wissen, in welcher Richtung der Strom um den Stab fliesst, wenn man der Axe desselben entlang sieht.

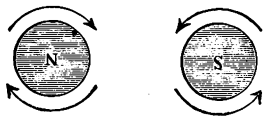

Fig. 115.

327. Solenoid. Eine spiralförmig gewundene Drahtrolle, durch welche ein Strom fliesst, wirkt auch dann noch als Magnet, wenn dieselbe keinen Eisenstab oder Stahlstab umgibt. (In diesem Falle allerdings nicht so kräftig, als wenn sich in der-

Digitized by Google

selben ein Eisenkern befindet.) Solche Spirale wird bisweilen **Solenoid** genannt. Ein Solenoid hat zwei Pole und eine neutrale Aequator-Gegend. Ampère fand, dass die Spirale Magnete anzieht und selbst von solchen angezogen wird. Auch wirkt sie anziehend auf eine zweite Spirale und hat ein magnetisches Feld, welches im allgemeinen mit demjenigen eines Stabmagnets Aehnlichkeit hat. Wird die Spirale so gestellt, dass sie sich um eine vertikale Achse drehen kann, so stellt sie sich in die Richtung von Nord nach Süd, längs des magnetischen Meridians. Fig. 116 zeigt ein Solenoid, welches mit Spitzen versehen ist, mittelst deren sich dasselbe an einer Schale aufhängen lässt (vgl. Fig. 121).

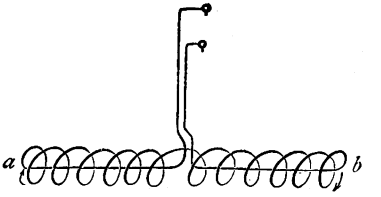

Fig. 116.

In Art. 192 wurde erklärt, dass eine einfache Windung eines Stromes wie eine magnetische Schale von derselben Gestalt und Stärke wirkt. Wir können uns vorstellen, dass ein Solenoid aus einer Reihe solcher magnetischen Schalen zusammengesetzt ist, welche so auf einander geschichtet sind, dass ihre nordsuchenden Oberflächen nach derselben Richtung liegen. Da durch jede Windung der Spirale dieselbe Elektrizitätsmenge fliesst, so haben die Windungen dieselbe magnetische Stärke und die gesamte magnetische Stärke des Solenoids ist der Anzahl der Windungen der Spirale proportional; sind n Windungen vorhanden, so ist die Zahl der magnetischen Kraftlinien, welche durch das Solenoid gehen, n mal so gross, als wenn nur eine Windung vorhanden wäre. Den Eisenkern verwendet man, weil er wegen seiner grössern magnetischen Induktion die Fähigkeit besitzt, die Zahl der Kraftlinien zu vermehren und an festen Polen zu vereinigen. Der Leser hat in Art. 191 gelernt, dass die Kraftlinien, welche von einem in einem Drahte fliessenden Strome herrühren, geschlossene, annähernd kreisförmige Kurven sind (vergl. Fig. 85) welche um den Draht herum führen. Wäre kein Eisenkern vorhanden, so würden viele dieser kleinen kreis-

Digitized by Google

förmigen Kraftlinien einfach als kleine geschlossene Kurven um ihren eigenen Draht verlaufen; da jedoch das Eisen einen grossen magnetischen Induktionskoeffizienten besitzt, so nehmen die Kraftlinien in der Nähe der Stelle, wo der Draht an einem Eisenkern vorbeiführt, eine andere Gestalt an, und statt kleiner Kreise um die einzelnen Drähte hat man dann Linien, welche durch den Eisenkern von einem Ende bis zum andern führen, und ausserhalb zurück von einem Pole zum andern, wie bei einem Stahlmagnet. Mit einigen wenigen Kraftlinien ist dies auch dann der Fall, wenn kein Eisen vorhanden ist; wenn Eisen vorhanden ist, ist es mit fast allen der Fall. Daher hat der Elektromagnet mit seinem Eisenkerne viel stärkere Pole als die Spirale des Leitungsdrahtes allein.

328. Gesetze über Elektromagnete. Folgende sind die wichtigsten Gesetze über Elektromagnete:

a) *Die Stärke*[1] *eines Elektromagnets ist der Stärke des magnetisierenden Stromes proportional* (d. h. also, der Elektrizitätsmenge, welche in dem Strome zirkuliert).

Dies ist jedoch nur so lange richtig, als der Eisenkern noch weit vom »Sättigungspunkte« seiner magnetischen Intensität entfernt ist. Ist das Eisen durch einen Strom bereits stark magnetisiert, so macht ein Strom von doppelter Stärke das Eisen nicht zu einem Magnet von doppelter Stärke. Nach Jenkin hat es keinen Zweck, den Strom so stark zu machen, dass das »Feld« mehr als 135 Einheiten der Intensität gibt. Für das Verhältnis der Stärke des magnetisierenden Stromes zur Stärke des von ihm erzeugten Elektromagnets gab Müller folgende Näherungsregel:

Die Stärke eines Elektromagnets ist dem Winkel proportional, dessen Tangente gleich der Stärke des magnetisierenden Stromes ist, oder

$$m = A \,.\, \text{arc} \,.\, \text{tang}\ C$$

wo C der in Ampère gemessene Strom und A eine Konstante ist, welche von der Konstruktion des betreffenden Magnets abhängt. Stellen wir uns vor, dass die Abschnitte der horizontalen Linie OT (Fig. 90) Stromstärken, und die Anzahl Bogengrade, welche von den schrägen Linien begrenzt wer-

1) Das Wort »Stärke« bedeutet hier »magnetische Stärke«, wie solche in Art. 102 definiert wurde. Sie darf unter keinen Umständen mit »Tragkraft« verwechselt werden, welche sowohl von der magnetischen Stärke, als auch von der Gestalt des Magnets und seiner Pole abhängt.

Digitized by Google

den, die Stärken des Magnetismus darstellen, so sehen wir leicht ein, dass der Winkel nie grösser, als 90^0 sein kann, selbst wenn die Linie OT in's Unendliche verlängert wird. Genauer heisst die Regel:

$$m = B \,.\, n \,.\, C \,\frac{1}{1 + \sigma \,.\, n \,.\, C}.$$

Hier ist C die Stromstärke, n die Anzahl der Drahtwindungen, B eine von der Konstruktion des Magnets und der Qualität des Eisens abhängende Konstante, und σ eine zweite Konstante (ein kleiner Bruch), welche von der Quantität und Qualität des Eisens abhängt und »Sättigungs-Konstante« genannt wird.

b) *Die Stärke eines Elektromagnets ist der Anzahl der Drahtwindungen seiner Spirale proportional.* Auch dieses Gesetz gilt nur dann, wenn der Eisenkern noch weit unter dem Sättigungspunkte ist, und wenn der Strom konstant erhalten wird. Denn wenn wir durch Vermehrung der Drahtwindungen den Gesamtwiderstand des Schliessungsbogens wesentlich vergrössern, so wird nach dem Ohm'schen Gesetze (vergl. Art. 180 und 345) die Stromstärke dadurch verringert. Dies ist von Wichtigkeit bei der Anfertigung von telegraphischen und andern Apparaten; denn während Elektromagnete mit »langen Spiralen«, welche aus vielen feinen Drahtwindungen bestehen, bei langen Schliessungsbögen, wo wir einen grossen Widerstand haben, gebraucht werden müssen, würden wir einen solchen Apparat bei einem Schliessungsbogen von sehr geringem Widerstande nicht gebrauchen können, denn der Widerstand einer langen dünnen Spirale würde unverhältnismässig gross sein; in diesem Falle wäre eine kurze Spirale mit wenigen Windungen aus starkem Draht erforderlich. (Vergl. Art. 352.)

c) Die Stärke eines Elektromagnets ist von der Dicke und dem Stoffe des Leitungsdrahtes unabhängig. Der Draht kann beliebig dick und ein beliebiges Metall sein, vorausgesetzt nur, dass derselbe den Strom eine ausreichende Anzahl von Malen um den Eisenkern führt, um ein Feld von der erforderlichen Stärke zu erzeugen.

d) *Die Stärke eines Elektromagnets ist von dem Durchmesser der Rollen unabhängig.* Ob die Rollen weiter sind, als der von ihnen eingeschlossene Kern, oder ob sie denselben ganz eng umgeben, ist gleichgültig, voraus-

Digitized by Google

gesetzt, dass sie so lang sind, dass der Elektromagnet wenigstens doppelt so lang als breit ist, und der Eisenkern noch an beiden Enden der Rolle hervorragt. Man hat auch gefunden, dass eine hohle Eisenröhre ebenso gut, wie ein fester Eisenkern zu verwenden ist, vorausgesetzt, dass die Röhre eine genügende Menge Eisen enthält.

Die Stärke m eines geraden Elektromagnets wird durch folgende Formel gegeben, in welcher l die Länge des Magnets, a' den Querschnitt des Eisens, k den Magnetisierungskoeffizienten (»Empfänglichkeit«), a den Querschnitt der Rolle, n die Anzahl der Windungen auf der Rolle und C die Stärke des magnetisierenden Stromes in Ampère bedeuten:

$$m = C \cdot \frac{n}{l} \cdot \frac{a + 4\pi a' k}{10}.$$

e) *Ein Strom hat einige Zeit nötig, um einen Eisenkern bis auf die volle Intensität zu magnetisieren.* Dies ist zum Teil eine Folge des Umstandes, dass ein Strom nicht sogleich seine volle Stärke erreicht, wenn der leitende Draht geschlossen wird; hauptsächlich rührt es aber von dem festen Eisen selbst her, welches zu seiner Magnetisierung einige Zeit erfordert. Faraday's grosser Elektromagnet im königlichen Institut erfordert ungefähr 2 Sekunden, um seine Maximalstärke zu erreichen. Beetz machte die Beobachtung, dass der Eisenkern eines Elektromagnets durch einen Strom von grosser elektromotorischer Kraft, welcher einen grossen Widerstand zu überwinden hat, schneller magnetisiert wird, als durch einen Strom von geringer elektromotorischer Kraft, welcher einen kleinen Widerstand zu überwinden hat, selbst wenn die Stromstärke in beiden Fällen dieselbe ist. Hieraus scheint hervorzugehen, dass die scheinbare Trägheit des Eisens, magnetisch zu werden, von dem Vorhandensein vorübergehender entgegengesetzter Induktionsströme (Art. 393) in dem Eisen selbst herrührt, welche während ihrer Dauer eine magnetische Induktion für sich ins Werk setzen, welche der des äussern Stromes entgegengesetzt ist.

329. Anfertigung von Elektromagneten. Die brauchbarste Form eines Elektromagnets ist diejenige, wo der Eisenkern hufeisenförmig gebogen ist, so dass beide Pole auf dieselbe Eisenarmatur wirken können. In diesem Falle teilt man die Rollen gewöhnlich in zwei auf Spulen gewundene Teile (Fig. 117 und 118). Der in Fig. 118 abgebildete Elektromagnet hat eine für Versuche im La-

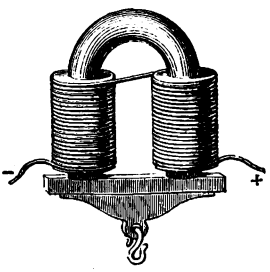

Fig. 117.

Digitized by Google

boratorium geeignete Form, und hat bewegliche Rollen, welche über die Eisenkerne gestülpt werden. Eine besondere von

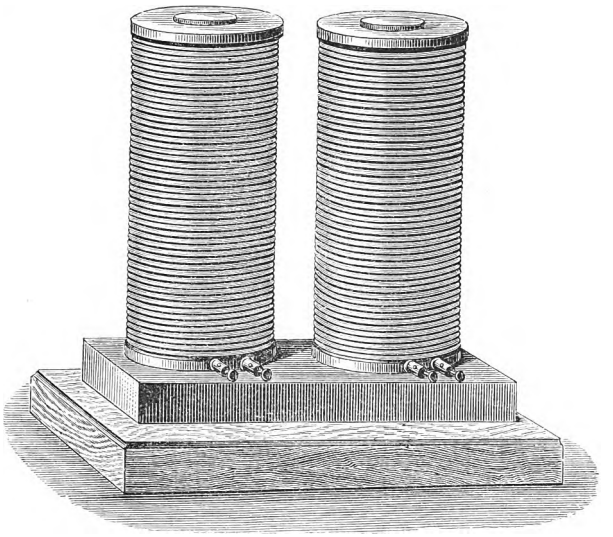

Fig. 118.

Ruhmkorff angegebene Form eines Elektromagnets zu Versuchen über Diamagnetismus ist in Fig. 127 abgebildet. Der grosse Nutzen des Elektromagnets in seiner Anwendung auf elektrische Glocken und telegraphische Apparate besteht darin, dass *sein Magnetismus unter der Kontrolle des Stromes steht;* wird der Leitungsdraht »geschlossen«, so wird das Eisen ein Magnet; wird derselbe »geöffnet«, so hört seine magnetische Wirkung auf.

330. Tragkraft von Elektromagneten. Die Tragkraft eines Elektromagnets hängt nicht allein von seiner »magnetischen Stärke«, sondern auch von seiner Gestalt ab, sowie von der Form seiner Pole und der Gestalt der weichen Eisenarmatur, welche von ihm angezogen wird. Dieselbe sollte so angebracht sein, dass möglichst viele Kraftlinien durch die Armatur führen, und die Armatur selbst sollte eine genügende Masse von Eisen enthalten. Joule konstruierte einen kräftigen Elektro-

Digitized by Google

magnet, der mehr als 1000 Kilo zu tragen vermochte. Die Maximal-Anziehung, die er zwischen einem Elektromagnet und seiner Armatur erzeugen konnte, betrug 200 Pfund pro Quadratzoll oder circa 13,800,000 Dyn pro Quadratzentimeter. Es lässt sich nachweisen, dass *die Anziehung einer Armatur weichen Eisens dem Quadrate der »magnetischen Stärke« des Elektromagnets proportional ist;* denn angenommen, die Stärke eines Elektromagnets würde verdoppelt, so induziert derselbe die entgegengesetzte Art des Magnetismus in der Eisenarmatur in doppelt so kräftiger Weise, wie vorher, und die resultierende Kraft (welche dem Produkte der beiden Stärken proportional ist) ist viermal so gross als vorher.

XXVII. VORLESUNG: *Elektrodynamik.*

331. Elektrodynamik. Im Jahre 1821, fast unmittelbar nach Oerstedt's Entdeckung von der Einwirkung eines Stromes auf einen Magnet, machte Ampère die weitere Entdeckung, dass ein Strom auf einen zweiten Strom wirkt, indem er denselben nach bestimmten feststehenden Gesetzen anzieht oder abstösst [1]). Diese Wirkungen untersuchte er experimentell, und aus den Versuchen stellte er eine Theorie der Kraft auf, welche ein Strom auf einen zweiten ausübt. Denjenigen Teil der Wissenschaft, welcher von der Kraft handelt, die ein Strom auf einen zweiten ausübt, nannte er **Elektrodynamik.**

332. Gesetze über parallele und sich kreuzende Ströme. Ampère entdeckte folgende Gesetze:

1) *Zwei parallel gerichtete Teile eines Stromes ziehen einander an, wenn der Strom in den Leitungsdrähten nach derselben Rich-*

1) Richtiger würde man sich ausdrücken, wenn man sagt, dass die Kraft auf stromleitende Konduktoren wirkt, statt auf die Ströme selbst. Es ist fraglich, ob der Strom in dem Konduktor angezogen wird; wir wissen bloss mit Gewissheit, dass der Konduktor selbst eine Kraftwirkung erleidet. Vergl. jedoch Art. 337.

Digitized by Google

tung fliesst; und stossen einander ab, wenn die Ströme in entgegengesetzten Richtungen fliessen.

Dieses Gesetz ist giltig, gleichviel ob die parallelen Drähte Teile von zwei verschiedenen Stromleitern oder Teile desselben Stromleiters sind. Die einzelnen Windungen einer Spirale, wie Fig. 116, ziehen sich z. B. an, wenn dieselben von einem Strome durchflossen werden, weil sich der Strom in benachbarten Teilen des Drahtes in derselben Richtung bewegt; eine solche Spirale verkürzt sich daher, wenn durch dieselbe ein Strom geschickt wird.

2) *Zwei Stromleiter, welche sich unter einem Winkel kreuzen, ziehen einander an, wenn beide Ströme entweder nach dem Kreuzungspunkte oder beide von ihm fortfliessen, und stossen einander ab, wenn der eine nach jenem Punkte und der andere von demselben fortfliesst.*

In Fig. 119 haben wir demnach 3 Fälle der Anziehung und 2 Fälle der Abstossung.

3) *Wenn ein Element eines Stromleiters eine Kraft auf ein anderes Element eines Stromleiters ausübt, so strebt jene Kraft stets das letztere rechtwinklig zu ihrer eigenen Richtung zu stellen.* Im Falle zweier parallelen Stromleiter wirkt z. B. die anziehende oder abstossende Kraft rechtwinklig zu den Strömen selbst.

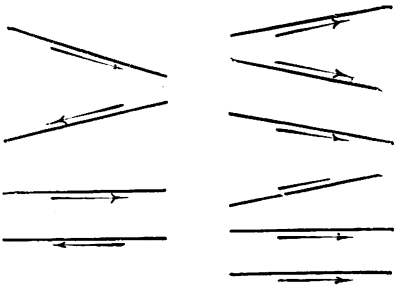

Fig. 119.

Ein Beispiel für das zweite und dritte Gesetz zeigt Fig. 120. Hier sind zwei Ströme *ab* und *cd* um den Mittelpunkt O beweglich. Zwischen *a* und *d* findet *Abstossung* statt, ebenso zwishen *b* und *c*, während in den beiden andern Quadranten *Anziehung* stattfindet, zwischen *a* und *c* und zwischen *b* und *d*.

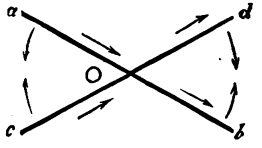

Fig. 120.

Die vorstehenden Gesetze lassen

Digitized by Google

sich zu einem zusammenfassen: Welche Lage auch 2 Stromleiter haben mögen, sie sind stets bestrebt sich so zu stellen, dass ihre Ströme möglichst nahe denselben Weg fliessen.

4) *Die Kraft, welche 2 parallele Stromleiter auf einander ausüben, ist dem Produkte der Stromstärken und der Länge der Stromleiter direkt, ihrem Abstande umgekehrt proportional.*

333. Ampère's Gestell. Um diese Anziehungen und Abstossungen beobachten zu können, konstruierte Ampère den nach ihm benannten, in Fig. 121 abgebildeten Apparat, das

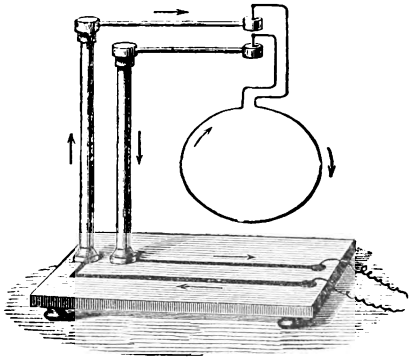

Fig. 121.

Ampère'sche Gestell, welches zwei aufrechte Stützen trägt, an denen man Konduktoren, welche aus Draht verfertigt und verschieden gestaltet sind, derart aufhängen kann, dass dieselben rotieren können. Die Figur zeigt eine einfache Schlinge, welche an den Stützen hängt. Die Enden der Drähte des beweglichen Teiles tauchen in 2 Quecksilbernäpfe, wodurch für gute Berührung gesorgt ist. Das Solenoid, Fig. 116, lässt sich in derselben Weise aufhängen.

Mit Hilfe dieses Apparates bewies Ampère noch die folgenden Sätze:

a) Ein Stromleiter, welcher so gebogen ist, dass der Strom auf zwei dicht neben einander liegenden Wegen hin- und zurückfliesst, übt auf äussere Punkte keine Kraft aus.

Digitized by Google

b) Ein Stromleiter, welcher eine gebrochene Linie darstellt oder in Zick-Zack-Form verläuft, übt auf einen benachbarten Stromleiter dieselben magnetischen Wirkungen aus, als wenn er gerade wäre.

c) In keinem der verschiedenen Fälle hat man eine Kraft, welche einen Konduktor in seiner eigenen Längsrichtung zu bewegen strebt.

d) Die Kraft zwischen 2 Konduktoren von beliebiger Gestalt ist unabhängig von der linearen Grösse des Systems, vorausgesetzt, dass die Abstände in demselben Verhältnis wachsen, wie die Längen der Konduktoren, und dass die Stromstärken unverändert bleiben.

Der besondere Fall der Fig. 122 lässt den Wert dieser Versuche erkennen. AB und CD mögen zwei stromleitende

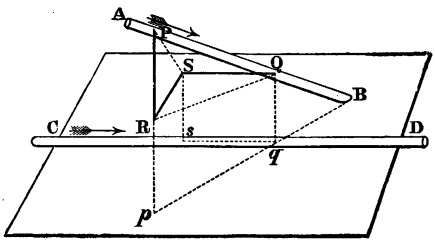

Fig. 122

Drähte sein, welche weder parallel laufen, noch in derselben Ebene liegen. Aus Satz b) ergibt sich, dass die Kraft dieselbe bleibt, wenn wir das Stück PQ durch den gebogenen Draht PRSQ ersetzen. Das Stück PR führt senkrecht nach unten, und da auf dasselbe nach Satz c) keine Kraft in der Richtung seiner Länge wirken kann, so wird dies Stück von CD weder angezogen noch abgestossen. In dem Stücke RS fliesst der Strom rechtwinklig zu CD, so dass auch dieses Stück von CD weder angezogen, noch abgestossen wird. In dem Teile SQ fliesst der Strom parallel zu CD und in derselben Richtung, und folglich wird SQ nach unten gezogen. Das Gesamtresultat ist also, dass PQ nach CD gezogen wird. Auf die Stücke

Digitized by Google

PR und RS wirken jedoch drehende Kräfte, indem P um R als Mittelpunkt nach C und R horizontal um S ebenfalls nach C getrieben werden. In Folge dieser Kräfte würde AB das Bestreben haben, sich parallel zu CD zu stellen.

334. Ampère's Theorie. Gestützt auf die 4 vorhergehenden experimentellen Sätze, stellte Ampère eine sorgfältig ausgearbeitete mathematische Theorie auf, bei welcher er annahm, dass für den Fall dieser Kräfte, welche offenbar durch einen leeren Raum in die Ferne wirkten, die Wirkung zwischen 2 Punkten in gerader Linie erfolgte, und die Gesamtanziehung der Summe der einzelnen Anziehungen gleich wäre. Faraday's Untersuchungen haben jedoch zu andern Anschauungen geführt; und wir betrachten jetzt die gegenseitigen Anziehungen und Abstossungen als eine Folge von Kräften, welche in dem den Raum um und zwischen den Leitern füllenden Medium wirken. Wir betrachten jenen Raum als einen mit »Kraftlinien« erfüllten. Jeder einen Strom führende Draht hat ein magnetisches Feld, welches denselben umgibt, wie in Fig. 85; und jeder geschlossene Stromleiter wirkt wie eine magnetische Schale. Deshalb können alle diese elektrodynamischen Wirkungen als magnetische Wirkungen angesehen werden, und sie lassen sich im voraus für jeden besondern Fall unter jener Voraussetzung vorhersagen. So hat der Verfasser dieser Vorlesungen nachgewiesen [1]), dass für den Fall zweier parallelen, gleichlaufenden Ströme die »Kraftlinien«, welche von beiden Systemen herrühren, in einander übergehen und beide Stromleiter einschliessen, während für den Fall zweier parallelen, aber nicht gleichlaufenden Ströme die »Kraftlinien« derselben gegenseitige Abstossung zeigen. Maxwell's Theorie, dass ein Volta'scher Strom wie eine magnetische Schale wirkt (eine direkte Ableitung aus Faraday's Arbeit), ist praktisch ein fruchtbarerer Gedanke als derjenige Ampère's. Nach Maxwell's Theorie haben zwei Ströme, gerade so wie zwei magnetische Schalen, das Bestreben, sich so zu stellen, dass

1) Philosophical Magazine, November 1878, pag. 348.

Digitized by Google

sie möglichst viele der gegenseitigen »Kraftlinien« einschliessen (Art. 193 und 320). Dies wird der Fall sein, wenn sie möglichst nahe zusammenfallen, d. h. wenn die beiden Drähte überall parallel sind und die Ströme in derselben Richtung fliessen. In der That lassen sich alle elektrodynamischen Gesetze über parallele und sich kreuzende Ströme aus der Maxwell'schen Theorie in der einfachsten Weise ableiten.

Einen interessanten Versuch, welcher eine offenbare gegenseitige Abstossung zwischen benachbarten Teilen eines Stromleiters erkennen lässt, stellte Ampère in folgender Weise an. Ein durch eine Scheidewand in zwei Teile geteilter Trog, welcher aus nicht leitendem Material verfertigt ist, wird mit Quecksilber angefüllt. Auf demselben schwimmt ein metallener Bügel (aus Draht gebogen), von der in Fig. 123 veranschaulichten

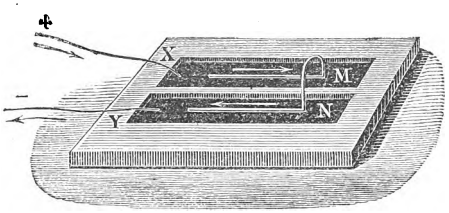

Fig. 123.

Gestalt, oder auch eine heberartige mit Quecksilber gefüllte Glasröhre. Wird durch den schwimmenden Konduktor ein Strom von X über MN und zurück nach Y gesandt, so bemerkt man, dass der schwimmende Bügel sich derart bewegt, dass die Länge des Stromlaufes dadurch vergrössert wird. Maxwell hat jedoch gezeigt, dass die wirkliche Erklärung von der Selbst-Induktion (Art. 404) der beiden parallelen Teile des schwimmenden Konduktors abhängig ist, und dass die Kraft unbegränzt abnehmen würde, wenn die beiden parallelen Teile ganz nahe neben einander liegen könnten.

335. Elektromagnetische Rotationen. Eine kontinuierliche Rotation lässt sich zwischen einem Magnet und einem Strom herstellen, oder auch zwischen 2 Teilen eines Stromes,

Digitized by Google

vorausgesetzt, dass ein Teil des Stromes beweglich ist, während ein anderer fest bleibt, oder dass der Strom in dem einen Teile umgekehrt werden kann. Von dem letzteren Mittel macht man bei Konstruktion der *elektromagnetischen Maschinen*, welche in Art. 375 beschrieben werden, Anwendung; die beiden ersten Methoden wendet man bei zahlreichen interessanten Apparaten an, welche Rotationen zur Anschauung bringen sollen, indem man zwischen 2 Teilen eines Stromes eine gleitende Berührung (Schleifkontakt) herstellt. Faraday und Ampère konstruierten verschiedene Arten von Rotationsapparaten. Einen der einfachsten zeigt Fig. 124, wo ein Strom durch *a* aufsteigt und

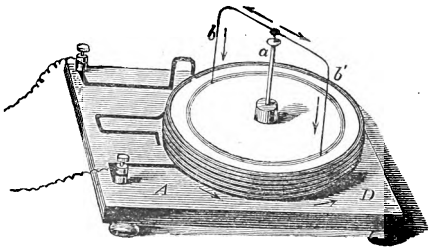

Fig. 124.

den leicht beweglich aufgehängten Draht *bb'* nach beiden Richtungen und abwärts durchfliesst, um dann in einen kreisförmigen, mit Quecksilber gefüllten Trog zu strömen. Letzterer besteht aus Kupfer und ist mit einem Drahte verbunden, welcher spiralförmig um die Aussenseite des Trogs gewunden ist und einen Teil des Stromleiters ausmacht. Die Pfeile zeigen die Richtung der Ströme. Die Ströme in den kreisförmigen Spiralen bilden eine magnetische Schale, deren nordsuchende Fläche nach oben gerichtet ist. Die von dieser Schale herrührenden Kraftlinien laufen daher vertikal nach oben. Gemäss der Umkehrung der Ampère'schen Regel (Art. 186) ergibt sich, dass ein Mensch, welcher in einem der horizontalen Zweige vom Zentrum *a* wegschwimmt und die Kraftlinien entlang sieht, d. h. auf dem Rücken schwimmend, mit dem Gesichte nach oben,

Digitized by Google

gleichzeitig mit dem Konduktor nach seiner Linken getrieben wird. Und sieht man von oben auf den balancierenden Konduktor, so wird derselbe beständig um den Mittelpunkt *a* in derselben Richtung wie die Zeiger einer Uhr rotieren. Ein Magnetpol kann auch zur Rotation um einen Strom veranlasst werden; und wenn ein vertikaler Magnet so aufgestellt ist, dass er sich um seine eigene Achse drehen kann, so rotiert derselbe, wenn ein Strom in seiner Mitte zu- und an seinen beiden Enden wieder abgeleitet wird. Wird der Strom an dem einen Ende zu- und am andern wieder abgeleitet, so findet keine Rotation statt, da die beiden Pole auf diese Weise nach entgegengesetzten Richtungen rotieren müssten, was unmöglich ist. Auch an flüssigen Leitern können elektromagnetische Rotationen stattfinden. Ein cylinderförmiges Metallgefäss, welches mit dem einen Pole einer Batterie verbunden ist, sei mit Quecksilber oder verdünnter Säure angefüllt, und es tauche ein Draht vom andern Pole in die Mitte der Flüssigkeit, so dass ein Strom vom Zentrum längs eines Radius nach dem Umfange fliessen kann oder umgekehrt; dann bemerkt man, dass die Flüssigkeit rotiert, wenn ein Magnet vertikal darüber gehalten wird oder das Gefäss auf den Pol eines kräftigen Magnets gestellt wird.

336. Elektrodynamometer. W. Weber konstruierte ein unter dem Namen *Elektrodynamometer* bekanntes Instrument, mittelst dessen man die Stromstärke durch die elektrodynamische Wirkung eines Teils des Stromleiters auf einen andern Teil desselben messen kann. Es ist in der That eine Art Galvanometer, bei welchem statt einer Nadel eine kleine Drahtrolle aufgehängt wird. Eine Form dieses Apparates, wo sowohl die grossen äussern, als auch die kleinen innern Rollen aus zwei parallelen Rollen mit vielen Windungen bestehen, zeigt Fig. 125. Die innere Rolle CD ist so aufgehängt, dass ihre Achse rechtwinklig ist zu der Achse der äussern Rollen AA, BB, und wird *bifilar* (vergl. Art. 118) von zwei feinen Metalldrähten getragen. Wenn ein Strom durch *beide* Rollen in *beliebiger* Richtung fliesst, so strebt die innere Rolle sich zu

Digitized by Google

drehen, und ihre Windungen denen der äussern Rollen parallel zu stellen; der Sinus des Winkels, um welchen die Aufhänge-Drähte gegen einander gedreht werden, ist dann dem Quadrate der Stromstärke proportional. Der Hauptvorteil dieses Apparates vor einem Galvanometer besteht darin, dass sich derselbe auch zur Messung von Induktionsströmen eignet, bei denen sehr schnelle Wechsel stattfinden, indem einem Strome in einer Richtung ein Strom von entgegengesetzter Richtung folgt und dieser Wechsel in der Minute gegen tausendmal stattfindet. Eine Galvanometernadel wird durch solche Ströme kaum beeinflusst, da die Nadel zu langsam schwingt.

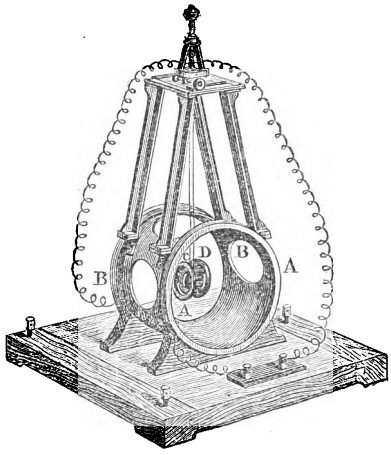

Fig. 125.

Siemens verwendet ein Elektrodynamometer mit Rollen, die aus sehr dickem Drahte verfertigt sind, zur absoluten Messung sehr starker Ströme, wie dieselben bei Erzeugung des elektrischen Lichtes gebraucht werden. Ein Elektrodynamometer kann man auch als einen »**Kraftmesser**« gebrauchen, um die elektrische Pferdekraft zu messen, welche eine Batterie entwickelt oder welche von einer elektrischen Lampe oder einer elektrischen Maschine verbraucht wird. In diesem Falle wird der ganze Strom durch eine feste Rolle aus dickem Drahte geschickt, während die bewegliche Rolle, die aus vielen Windungen von dünnem Drahte besteht, als Nebenschluss mit den Enden der Lampe oder Maschine verbunden ist, und auf diese Weise von einem Strome durchflossen wird, welcher der Potentialdifferenz zwischen jenen Punkten proportional ist (vergl. Art. 360d). Der Sinus des Ablenkungswinkels ist dann dem Produkte der beiden Ströme, d. h. dem Produkte des ganzen Stromes mal der Potentialdifferenz proportional. (Vergl. Art. 378a.)

337. **Elektromagnetische Wirkungen von Konvektions-Strömen.** Nach Faraday wirkt ein Strom von elektrisch geladenen Molekülen magnetisch wie ein wirklicher Konduktionsstrom. Dies wurde zuerst im Jahre 1876 von Rowland nachgewiesen, welcher fand, dass eine geladene, in schnelle Ro-

Digitized by Google

tation versetzte Scheibe auf einen Magnet dieselbe Wirkung ausübt, welche ein schwacher, kreisförmiger Strom haben würde. Konvektions-Ströme, welche aus Strömen von elektrisierten Molekülen bestehen, erfahren von Magneten ebenfalls eine Einwirkung. Die Konvektions-Entladungen in luftleere Röhren (Art. 292) können durch einen Magnet abgelenkt oder zur Rotation um einen Magnetpol veranlasst werden. Findet die Büschelentladung in einem starken magnetischen Felde statt, so wird dieselbe ebenfalls abgelenkt. Der Volta'sche Bogen (Art. 371) verhält sich ebenfalls wie ein biegsamer Konduktor und kann von einem Magnet angezogen oder abgestossen werden. Zwei in Ruhe befindliche, positiv elektrisierte Moleküle stossen einander ab, aber zwei parallele Ströme ziehen sich an (Art. 332), und wenn elektrisierte Moleküle, die sich hinter einander bewegen, wie Ströme wirken, so müsste eine (elektromagnetische) Anziehung zwischen zwei elektrisierten Molekülen stattfinden, die sich neben einander im Raume fortbewegen. Nach Maxwell's Theorie (Art. 390) ist die elektrostatische Abstossung genau der elektromagnetischen Anziehung gleich, wenn die Moleküle sich mit der Geschwindigkeit des Lichts bewegen.

In ganz jüngster Zeit machte Hall die Entdeckung, dass in dem Falle, wo man einen kräftigen Magnet auf einen Strom wirken lässt, welcher in einem sehr dünnen Metallstreifen fliesst, die Linien gleichen Potentials nicht mehr rechtwinklig zu den Strombahnen in dem Streifen sind. Diese Wirkung scheint mit der magnetischen Rotation des polarisierten Lichts (Art. 387) im Zusammenhange zu stehen, da der Koeffizient dieser transversalen Verschiebung, welche das magnetische Feld an dem Strome hervorbringt, bei Gold schwach positiv, bei Wismut stark + und bei Eisen — ist.

338. Ampère's Theorie des Magnetismus. Nachdem Ampère gefunden hatte, dass Solenoide (siehe Fig. 116) genau wie Magnete wirken, kam er auf den Gedanken, alle Magnete einfach als Vereinigungen von Strömen aufzufassen oder anzunehmen, dass um jedes einzelne Molekül eines Magnets beständig ein elektrischer Strom zirkuliert. Wir wissen, dass solche Ströme nicht ohne Unterlass fliessen könnten, wenn sie auf irgend welchen Widerstand stiessen, und wir wissen ferner, dass ein Widerstand existiert, wenn die Elektrizität von einem Moleküle zum andern übergeht. Da wir über den innern Zustand der Moleküle selbst nichts wissen, so können wir nicht mit Gewissheit behaupten, dass Ampère's Annahme unmöglich ist. Da ein Stromring der Elektrizität wie ein Magnet wirkt, so scheint in der That Grund zu der Annahme zu sein, dass Magnete bloss aus rotierenden Teilen elektrisierter Materie bestehen.

Digitized by Google

XXVIII. VORLESUNG: *Diamagnetismus.*

339. Diamagnetische Versuche. Im Jahre 1778 machte Brugmans von Leyden die Beobachtung, dass ein Stück Wismut, in die Nähe eines beliebigen Pols einer Magnetnadel gebracht, von demselben abgestossen wurde. Im Jahre 1827 beobachteten Le Baillif und Becquerel, dass auch Antimon von einem Magnetpole abgestossen wird. Im Jahre 1845 untersuchte Faraday mit Hilfe kräftiger Elektromagnete die magnetischen Eigenschaften einer grossen Anzahl von Körpern, und fand, dass viele, wie z. B. Eisen, vom Magnet angezogen, andere dagegen schwach abgestossen werden. Um diese beiden Klassen von Körpern zu unterscheiden, nannte er diejenigen, welche angezogen werden, **paramagnetisch** [1]), diejenigen, welche abgestossen werden, **diamagnetisch.** Die Eigenschaft derselben, von einem Magnet abgestossen zu werden, nannte er **Diamagnetismus.**

Faraday's Versuchsmethode bestand in Folgendem. Er hing einen kleinen Stab des Körpers in ein kräftiges magnetisches Feld zwischen die Pole eines Elektromagnets und beobachtete, ob der Stab in eine **axiale** Stellung gezogen wurde, wie in Fig. 126, so dass seine Längsachse mit der Verbindungslinie der beiden Pole zusammenfiel, oder ob derselbe in eine **äquatoriale** Stellung abgestossen wurde, rechtwinklig zur Verbindungslinie der beiden Pole, die Kraftlinien des Feldes durchkreuzend, wie es die Stellung des kleinen Stabes in Fig. 127 zeigt, welcher zwischen

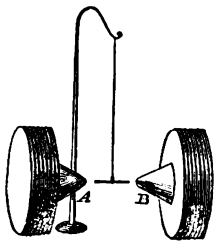

Fig. 126.

1) Oder einfach »magnetisch«. Einige Autoren gebrauchen den Ausdruck »ferromagnetisch«. Gegen sideromagnetisch würde weniger einzuwenden sein, als gegen dieses zweideutige Wort.

Digitized by Google

die Pole eines nach Ruhmkorff'schem Muster konstruierten Magnets gehängt ist.

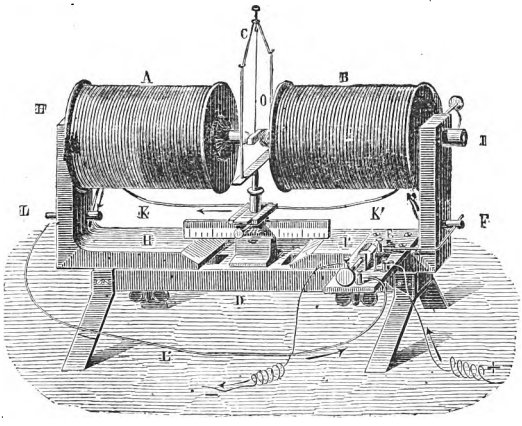

Fig. 127.

Folgendes sind die Körper, welche nach dieser Methode untersucht worden sind:

Paramagnetisch.	Diamagnetisch.
Eisen.	Wismut, Phosphor,
Nickel.	Antimon, Zink,
Kobalt.	Quecksilber, Blei,
Mangan.	Silber, Kupfer,
Chrom.	Gold, Wasser,
Cerium.	Alkohol, Tellur,
Titan.	Selen, Schwefel,
Platin [1]).	Thallium,
Viele Erze und Salze, welche die obigen Metalle enthalten.	Wasserstoffgas,
Sauerstoffgas.	Luft.

1) Chemisch reines Platin ist nach Wiedemann diamagnetisch.

Digitized by Google

Flüssigkeiten wurden in Glasgefässe gegossen und dann zwischen die Pole des Elektromagnets gehängt. Fast alle Flüssigkeiten sind diamagnetisch, ausgenommen die Salzlösungen der magnetischen Metalle, von denen einzelne schwach magnetisch sind; Blut dagegen ist diamagnetisch, obgleich es Eisen enthält. Um Gase zu untersuchen, bläst man Gasblasen und beobachtet, ob dieselben in das magnetische Feld gezogen oder aus demselben hinausgetrieben werden. Sauerstoffgas stellte sich als magnetisch heraus: Ozon ist noch stärker magnetisch, wie durch neuere Untersuchungen festgestellt worden ist.

340. **Quantitative Resultate.** Die magnetische oder diamagnetische Stärke eines Körpers lässt sich mittelst eines bestimmten *Magnetisierungs-Koeffizienten k* (Art. 313) ausdrücken, welcher das Verhältnis der magnetischen Intensität zur magnetisierenden Kraft des Feldes angibt, in welchem sich der Körper befindet. Sir W. Thomson nennt diesen Koeffizienten die magnetische *Empfänglichkeit* des Körpers. Wird die magnetische Intensität durch i ausgedrückt, und die Stärke des magnetisierenden Feldes durch H, so ist

$$i = k \cdot H.$$

Für paramagnetische Körper hat k positive Werte; für diamagnetische negative. Nach Thalen hat k für Eisen den Werth + 45; allein Barlow's höchster Wert für Eisen betrug nur 32,8. Ewing hat kürzlich beobachtet, dass für weiches Eisen in dünnen Drähten, innerhalb eines Solenoids magnetisiert, k den Wert 1300 bis 1400 hat. Für Wismut ist nach Maxwell $k = -0{,}0000025$. Die Abstossung des Wismuts ist unendlich schwächer, als die Anziehung des Eisens. Plücker verglich die magnetischen Kräfte von gleich schweren Körpern, und indem er die des Eisens = 1,000,000 setzte, fand er folgende Werthe für den »spezifischen Magnetismus« der Körper:

Eisen	+	1,000,000
Magneteisenstein . . .	+	402270
Schwefelsaures Eisenoxyd	+	1110
Eisenvitriol	+	780
Wasser	—	7,8
Wismut	—	23,6

341. **Scheinbarer Diamagnetismus als Folge des umgebenden Mediums.** Schwach magnetische Körper verhalten sich diamagnetisch, wenn sie in einem stärker magnetischen Mittel aufgehängt werden. Eine kleine Glasröhre, welche mit einer schwachen Lösung von Eisenchlorür gefüllt ist, zeigt die axiale Stellung, d. h. ist paramagnetisch, wenn sie in der Luft zwischen den Polen eines Elektromagnets hängt. Wird

Digitized by Google

sie aber von einer stärkern (und deshalb mehr magnetischen) Lösung desselben Körpers umgeben, so zeigt sie die Aequator-Stellung und wird scheinbar abgestossen wie diamagnetische Körper. Die äquatoriale Stellung eines Körpers beweist also nur, dass derselbe weniger magnetisch ist, als das den umgebenden Raum erfüllende Medium. Ein Ballon steigt, obgleich er Masse und Gewicht besitzt, in der Luft empor, nach dem Gesetze der Schwere, weil das umgebende Medium stärker angezogen wird, als der Ballon. Man findet jedoch, dass diamagnetische Abstossung auch im leeren Raume stattfindet; daraus scheint hervorzugehen, dass der Raum [1]) selbst stärker magnetisch ist, als die zu den diamagnetischen gezählten Körper.

342. Diamagnetische Polarität. Anfangs glaubte Faraday, dass sich diamagnetische Abstossung durch die Annahme erklären liesse, dass eine »diamagnetische Polarität« vorhanden wäre, das Umgekehrte der gewöhnlichen magnetischen Polarität. Nach dieser Auffassung, welche jedoch Faraday selbst später ganz fallen liess, induziert ein Magnet, dessen N-Pol dem Ende eines Wismutstabes genähert wird, in diesem Ende einen N-Pol (das Umgekehrte von dem, welchen er in einem Stabe von Eisen oder einem andern magnetischen Metall induzieren würde) und stösst denselben also ab. Weber adoptierte diese Auffassung und Tyndall war ein eifriger Verteidiger derselben, besonders nachdem er entdeckt hatte, dass die abstossende diamagnetische Kraft dem Quadrate der verwendeten magnetischen Kraft proportional ist, ein Gesetz, welches das Seitenstück zu dem Gesetze über die durch Induktion erzeugte Anziehung ist (Art. 330). Zur Begründung dieser Auffassung hat man mannigfache Versuche angestellt; und mehrere haben sogar geglaubt, dass Ost- und Westpol eines diamagnetischen Stabes, welcher äquatorial in einem Kraftfelde liegt, verschiedene Eigenschaften besitzen. Die im vorhergehenden Paragraphen genannten Versuche legen jedoch eine Erklärung nahe, welche auf einfachere

1) Oder vielleicht der »Aether«, welcher das ganze Weltall erfüllt.

Digitized by Google

Weise mit den Thatsachen in Einklang gebracht werden kann. Man kann nicht im Zweifel darüber sein, dass die Erscheinung eine Folge magnetischer Induktion ist; und es ist nachgewiesen (Art. 89), dass die Stärke der Induktion, welche in einem Medium stattfindet, von der magnetischen, induktiven Kapazität (oder von der »Durchdringlichkeit«, Permeabilität) jenes Mediums abhängt. Diese magnetische Durchdringlichkeit lässt sich durch einen »Koeffizienten magnetischer Induktion« [1]) ausdrücken, welcher das Verhältnis zwischen der wirklichen Induktion und der dieselbe erzeugenden magnetisierenden Kraft darstellt. Dieser Koeffizient ist immer positiv; für magnetische Media ist derselbe grösser als 1, für diamagnetische Media kleiner als 1 und für den leeren Raum = 1. Der Leser kann sich hierüber in folgender Weise eine Vorstellung verschaffen: Angenommen, es wirkt eine bestimmte magnetisierende Kraft in einer bestimmten Richtung, so würde natürlich in Folge dessen längs einer bestimmten Anzahl von Induktionslinien (oder von sogenannten »Kraftlinien«) Induktion stattfinden, und im leeren Raume würde die Anzahl der »Induktionslinien« numerisch die Kraft darstellen. Wäre jedoch der betrachtete Raum mit Eisen erfüllt, so würde dieselbe magnetisierende Kraft bei Weitem *mehr* Induktionslinien in dem Raume erzeugen, da das Eisen einen grossen Koeffizienten magnetischer Induktion besitzt. Wäre aber der betrachtete Raum mit Wismut erfüllt, so würde die nämliche magnetisierende Kraft in dem Wismut *weniger* »Induktionslinien« erzeugen, als im leeren Raume. Doch würden die induzierten Linien noch in derselben allgemeinen *Richtung* verlaufen, wie im leeren Raume; nicht *in der entgegengesetzten Richtung*, wie Weber und Tyndall behaupten. Die Folge der Thatsache, dass in diamagnetischen Körpern eine schwächere Induktion stattfindet, lässt sich dadurch zur

1) Der Leser darf diesen »Koeffizienten magnetischer Induktion«, welchen wir mit u bezeichnen wollen, nicht mit dem »Magnetisierungs-Koeffizienten« k verwechseln (Art. 313 und 340). Beide Koeffizienten hängen jedoch in der Weise von einander ab, dass $u = 1 + 4\pi k$.

Digitized by Google

Anschauung bringen, dass diese Körper von dort, wo die magnetische Kraft stark ist, nach dort, wo dieselbe schwächer ist, getrieben werden. Aus diesem Grunde entfernt sich eine Wismutkugel von einem Magnet, und stellt sich ein kleiner Wismutstab zwischen den konischen Polen des Elektromagnets (Fig. 127) in die Aequatorlage, so dass seine Enden in Gegenden liegen, wo die magnetische Kraft schwächer ist. Man kann nicht zweifeln, dass in einem magnetischen Felde von *gleichmässiger* Stärke ein Wismutstab sich in die Richtung der Induktionslinien stellen würde.

343. **Magneto-krystallische Wirkung.** Im Jahre 1822 sprach Poisson den Satz aus, dass ein Körper mit krystallinischer Struktur in verschiedenen Richtungen auch verschiedene magnetische Kräfte haben würde, vorausgesetzt, dass er überhaupt magnetisch wäre; und im Jahre 1847 machte Plücker die Entdeckung, dass ein Stück Turmalin, welches an sich schwach paramagnetisch ist, sich wie ein diamagnetischer Körper verhielt, wenn es so aufgehängt wurde, dass die Achse des Krystalls horizontal war. Faraday wiederholte den Versuch mit einem Krystall von Wismut und fand, dass derselbe das Bestreben hatte, sich mit seiner Krystallisationsachse in die Richtung der Linien des Feldes, in die Achsenlage zu stellen. Die magnetische Kraft, welche in dieser Weise auf Krystalle wirkte in Folge ihrer Eigentümlichkeit, dass sie eine bestimmte Struktur haben, nannte er *magneto-krystallische Kraft.* Plücker versuchte, das magneto-krystallische Verhalten der Krystalle mit ihrem optischen Verhalten in Verbindung zu bringen, indem er folgendes Gesetz aufstellte: Es findet an den Polen eines Magnets entweder Abstossung oder Anziehung der optischen Achse statt (oder beider optischen Achsen, wenn die Krystalle zwei Achsen haben); und ist der Krystall negativ (d. h. optisch negativ, wo der zweite Brechungsexponent kleiner als der erste), so findet Abstossung, ist der Krystall positiv, so findet Anziehung statt. Tyndall hat versucht, die Unzulänglichkeit dieses Gesetzes nachzuweisen, da die paramagnetischen oder diamagnetischen Kräfte

Digitized by Google

des Körpers dabei nicht als ein Ganzes in Rechnung gezogen würden. Er findet, dass die magneto-krystallische Achse der Körper im allgemeinen *eine Achse der grössten Dichte ist, und dass diese Achse sich in die Achsenlage stellt, wenn der Körper paramagnetisch, dagegen in die Aequatorlage, wenn der Körper diamagnetisch ist.* Bei solchen Körpern, welche wie Schiefer und viele Krystalle spaltbar sind, liegen die Spaltungsflächen gewöhnlich rechtwinklig zur magneto-krystallischen Achse.

344. Diamagnetismus von Flammen. Im Jahre 1847 machte Bancalari die Entdeckung, dass Flammen von der Verbindungslinie der Pole eines Elektromagnets weggestossen werden. Faraday zeigte, dass alle Arten von Flammen, ebenso wie aufsteigende Ströme von heisser Luft oder Rauch, vom Magnet beeinflusst werden, und das Bestreben haben, von dort, wo die magnetischen Kräfte stark sind, sich nach dort zu bewegen, wo dieselben schwächer sind. Gase (mit Ausnahme von Sauerstoff und Ozon) und besonders heisse Gase sind schwach diamagnetisch. Aber die wirkliche Abstossung und das Ablenken der Flammen ist vielleicht zum Teil die Folge einer elektromagnetischen Kraft, ähnlich derjenigen, welche der Magnet auf den Konvektionsstrom des Volta'schen Bogens und auf andere Konvektionsströme ausübt. Die elektrischen Eigenschaften der Flamme sind in Art. 7 und 291 erwähnt.

Digitized by Google

KAPITEL VI.

VON DER STROMMESSUNG etc.

XXIX. VORLESUNG: *Das Ohm'sche Gesetz und seine Folgerungen.*

345. In Art. 180 wurde das wichtige Ohm'sche Gesetz wie folgt aufgestellt: *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem (Gesamt)-Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional.*

Bei Anwendung der von den Elektrotechnikern benutzten Einheiten, welche wir in Art. 323 erklärten, können wir jetzt dem Ohm'schen Gesetze folgenden bestimmten Ausdruck geben: *Die Anzahl der Ampère eines Stromes, welcher durch einen Stromleiter fliesst, ist gleich der Anzahl von Volt der elektromotorischen Kraft, dividiert durch die Anzahl der Ohm des im ganzen Stromleiter vorhandenen Widerstandes.* Oder

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}$$

$$C = \frac{E}{R}.$$

In der Praxis ist die Sache jedoch nicht ganz so einfach, denn nehmen wir eine bestimmte Anzahl von Elementen und bilden den Stromleiter aus verschiedenen Teilen, welche der Strom alle durchfliessen muss, so haben wir nicht allein die elektromotorischen Kräfte der Elemente, sondern auch ihre Widerstände und den Widerstand aller Teile des Stromkreises in Rechnung zu bringen. Fliesst der Strom z. B. von der Zink-

Digitized by Google

platte des ersten Elementes durch die Flüssigkeit zum Kupfer (oder zur Kohle), von dort durch einen Verbindungsdraht oder eine Schraube zum nächsten Elemente, durch die Flüssigkeit desselben, durch die Verbindungsschrauben und Flüssigkeiten der übrigen Elemente, dann durch einen Draht nach einem Galvanometer, dann durch die Rollen des Galvanometers, hierauf etwa durch einen elektrolytischen Becher und endlich durch einen Draht zum Zinkpole der Batterie zurück. In diesem Falle haben wir mehrere einzelne elektromotorische Kräfte, welche sämtlich einen Strom veranlassen, und eine Anzahl von verschiedenen Widerständen, von denen jeder den Strom hemmt und zu dem Gesamt-Widerstande beiträgt. Wenn wir in diesem Falle die einzelnen Werte aller verschiedenen elektromotorischen Kräfte und aller verschiedenen Widerstände wüssten, so könnten wir die Stromstärke berechnen, denn dieselbe würde den Wert haben:

$$C = \frac{e' + e'' + e''' + \ldots}{r' + r'' + r''' + \ldots} = \frac{\text{Gesamte elektromotorische Kraft}}{\text{Gesamtwiderstand.}}$$

Wäre eines der Elemente verkehrt aufgestellt, so würde seine elektromotorische Kraft derjenigen der andern Elemente entgegenarbeiten; eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft muss daher subtrahiert oder in der algebraischen Summe als negativ genommen werden. Die »Polarisation« (Art. 163 und 413), welche in Batterieen oder elektrolytischen Zellen auftritt, nachdem dieselben eine Zeitlang in Thätigkeit gewesen sind, ist eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft, und vermindert die Summe der elektromotorischen Kräfte des Stromkreises. In gleicher Weise wird die Stärke des arbeitenden Stromes durch den induzierten Extrastrom geschwächt, welcher entsteht, wenn ein Strom einer Batterie eine magnetelektrische Maschine (Art. 377) treibt.

346. Leitungsfähigkeit und Widerstand. Der Ausdruck Leitungsfähigkeit wird bisweilen für das Gegenteil von

Digitized by Google

Widerstand gebraucht; und der reziproke Wert $\frac{1}{r}$ stellt die Leitungsfähigkeit eines Leiters vor, dessen Widerstand gleich r Ohm. In der Praxis ist es jedoch gebräuchlicher, von den *Widerständen* der Leiter als von ihren Leitungsfähigkeiten zu sprechen.

347. Gesetze über den Widerstand. In einem Schliessungsbogen können zwei Arten von Widerständen auftreten: 1) die Widerstände der Leiter selbst; 2) die Widerstände, welche von der unvollkommenen Berührung an Spitzen herrühren. Die letztere Art des Widerstandes wird beeinflusst durch einen Druck, denn werden die Oberflächen zweier Leiter in innigere Berührung mit einander gebracht, so geht der Strom leichter von einem Konduktor zum andern über. Der Uebergangs-Widerstand zweier Konduktoren von Kupfer variiert zwischen unendlich und einem kleinen Bruchteil eines Ohm, je nach dem Drucke. Das Variieren des Widerstandes an einer Spitze bei unvollkommener Berührung benutzt man bei Telephonen (Art. 434, 436). Die Gesetze über Widerstand von Leitern sind folgende:

1) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist seiner Länge proportional.* Ist der Widerstand eines Telegraphendrahtes von einer Meile = 13 Ohm, so ist derjenige eines 50 Meilen langen Drahtes $50 \times 13 = 650$ Ohm.

2) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist der Fläche seines Querschnitts umgekehrt proportional,* und deshalb in den gebräuchlichen runden Drähten *dem Quadrate des Durchmessers umgekehrt proportional.* Der gewöhnliche Telegraphendraht ist ungefähr 0,4 cm. dick; ein doppelt so dicker Draht würde 4mal besser leiten, da derselbe einen 4mal so grossen Querschnitt hat; daher würde dieselbe Länge von ihm nur den 4. Teil des Widerstandes bieten.

3) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes von gegebener Länge und Dicke hängt von dem Material ab, aus welchem derselbe verfertigt ist, d. h. von dem* **spezifischen Widerstande** *des Materials.*

348. Spezifischer Widerstand. Der spezifische Widerstand eines Körpers lässt sich am besten als der Widerstand

Digitized by Google

in »absoluten« C.G.S. Einheiten (d. h. in 1000 Milliontel eines Ohm) eines Kubikzentimeters des Körpers angeben. Die folgende Tabelle gibt auch die relative Leitungsfähigkeit, wobei diejenige des Silbers gleich 100 gesetzt ist.

Tafel des spezifischen Widerstandes.

Körper.	Spezif. Widerstand.	Relative Leitungsfähigkeit.
Metalle:		
Silber	1609	100
Kupfer	1642	96
Gold	2154	74
Eisen (weiches) . .	9827	16
Blei	19847	8
Argentan	21170	7,5
Quecksilber (flüssig)	96146	1,6
Selen (ausgeglüht) .	6×10^{13}	$\frac{1}{40,000,000,000}$
Flüssigkeiten:		
Reines Wasser bei 22° C.	$7{,}18 \times 10^{10}$	weniger als $\frac{1}{1,000,000}$
Verdünnte H_2SO_4 ($1\frac{1}{2}$ Säure)	$0{,}332 \times 10^{10}$	
Verdünnte H_2SO_4 ($\frac{1}{3}$ Säure)	$0{,}126 \times 10^{10}$	
Isolatoren:		
Glas, bei 200° C.	$2{,}27 \times 10^{16}$	weniger als $\frac{1}{10^{12}}$
Guttapercha, bei 20°C.	$3{,}5 \times 10^{23}$	

Es stellt sich heraus, dass diejenigen Körper, welche eine hohe Leitungsfähigkeit in Bezug auf Elektrizität besitzen, auch die besten Wärmeleiter sind. Flüssigkeiten sind schlechtere Leiter als die Metalle, und Gase sind vollkommene Nichtleiter, ausgenommen den Fall, wo dieselben so stark verdünnt sind,

Digitized by Google

dass durch dieselben eine Entladung durch Konvektion möglich ist (Art. 283) [1]).

349. Einfluss der Wärme auf den Widerstand. Temperaturveränderungen üben einen vorübergehenden Einfluss auf die Leitungsfähigkeit der Metalle aus. Forbes fand, dass der Widerstand des Eisens bei einer Temperaturerhöhung bedeutend zunahm. Die Widerstände von Kupfer und Blei nehmen ebenfalls zu, während andrerseits derjenige der Kohle beim Erwärmen abzunehmen scheint. Argentan und andere Legierungen weisen solche grossen Aenderungen nicht auf und werden daher zur Anfertigung von Normal-Widerstandsrollen benutzt. Diejenigen Flüssigkeiten, welche nur unter gleichzeitiger Zersetzung leiten (Art. 205), leiten besser bei Temperaturerhöhung. Der Einfluss des *Lichtes* auf die Veränderung des Widerstandes des Selens wird in Art. 389 besprochen werden.

350. Schema eines Stromkreises. Betrachten wir den typischen Fall des in Fig. 128 veranschaulichten Stromkreises, wo eine Batterie ZC mit einem Galvanometer durch Drähte verbunden ist, deren Widerstand R ist. Die gesamte elektromotorische Kraft der Batterie wollen wir E nennen und den gesamten innern Widerstand der Flüssigkeiten in den Elementen r. Der Widerstand der Rollen des Galvanometers möge G heissen. Dann ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetze:

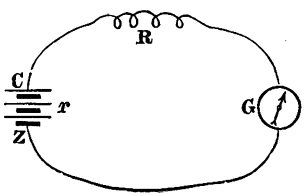

Fig. 128.

$$C = \frac{E}{R + r + G}.$$

1) Anm. des Uebers. Mit Berücksichtigung der vorstehenden Gesetze ist es leicht, den Widerstand W eines Drahtes in Ohm zu berechnen, der n cm lang, dessen Querschnitt q Quadratmillimeter und dessen spezifischer Widerstand s ist. Es wird

$$W = \frac{n \cdot s}{q} \, 10^{-7} \text{ Ohm.}$$

Digitized by Google

Der *innere Widerstand r* der Flüssigkeiten der Batterie steht in einer sehr wichtigen Beziehung zu dem *äussern Widerstande* des Schliessungskreises (R und G umfassend), denn von dieser Beziehung hängt es ab, wie wir für einen besondern Zweck die Elemente der Batterie am besten anordnen. Nehmen wir z. B. an, wir hätten eine Batterie von 50 kleinen Daniell'schen Elementen zur Verfügung, wo wir die elektromotorische Kraft jedes derselben zu einem Volt rechnen können (oder genauer 1,079 Volt) und jedes Element einen innern Widerstand von 2 Ohm hat. Hätten wir diese Elemente in einem Schliessungskreise zu verwenden, wo von Natur schon ein grosser Widerstand auftritt, so würden wir sie »hinter einander« reihen und dieselben nicht in parallelen Reihen eines zusammengesetzten Schliessungsbogens aufstellen. Denn angenommen, wir hätten unsern Strom durch eine Telegraphenlinie von 100 Meilen Länge zu senden, so beträgt der äussere Widerstand R mindestens 1300 Ohm (wenn wir 13 Ohm auf die Meile Draht rechnen). In Folge dieses Widerstandes würde ein einziges solches Element einen Strom von weniger als einem Milli-Ampère liefern, denn für diesen Fall ist $E = 1$, $R = 1300$, $r = 2$, und daher $C = \frac{E}{R + r}$ $= \frac{1}{1300 + 2} = \frac{1}{1302}$ tel eines Ampère, ein viel zu schwacher Strom, um einen telegraphischen Apparat in Bewegung zu setzen.

Bei 50 solchen Elementen hätten wir $E = 50$ $r = 100$ und daher

$C = \frac{50}{1300 + 100} = \frac{50}{1400} = \frac{1}{28}$ tel eines Ampère, oder etwas mehr als 35 Milli-Ampère. Bei Telegraphenleitungen, wo die Apparate einen Strom von 5 bis 10 Milli-Ampère erfordern, um in Bewegung gesetzt zu werden, rechnet man gewöhnlich für jede 5 Meilen ein Daniell'sches Element mehr, indem jeder Apparat im Schliessungsbogen so gezählt wird, dass sein Widerstand gleich demjenigen eines 10 Meilen langen Drahtes gesetzt wird.

Ist jedoch der Widerstand des äussern Schliessungsbogens

Digitized by Google

gering, so müssen die Elemente derart aufgestellt werden, dass der gesamte innere Widerstand der Batterie gering bleibt. Nehmen wir z. B. an, wir wollten weiter nichts als ein kurzes Stück Platindraht bis zur Rotglühhitze erwärmen, und hätten starke Kupferdrähte, um das Platin mit der Batterie zu verbinden. Hier beträgt der äussere Widerstand unter Umständen weniger als ein Ohm. In diesem Falle würde ein einziges Element einen Strom von $\frac{1}{3}$ Ampère (oder 333 Milli-Ampère) durch den Draht senden, denn es ist jetzt $E = 1$, $R = 1$, $r = 2$. Dagegen würden 10 Elemente bloss anderthalb mal so viel liefern, nämlich 476 Milli-Ampère, und 50 Elemente bloss 495 Milli-Ampère, und bei einer unendlich grossen Anzahl von Elementen, in Reihen angeordnet, könnte der Strom doch nicht mehr als 500 Milli-Ampère stark sein, weil durch jedes Element E um 1, R aber um 2 grösser wird. Es ist also klar, dass das Aneinanderfügen vieler Elemente in Reihen allerdings da von Vorteil ist, wo der Widerstand einer langen Drahtlinie zu überwinden ist, dass jedoch bei geringem äussern Widerstande der praktische Vorteil des Aneinanderfügens von Elementen in Reihen bald eine Grenze erreicht.

Nehmen wir jedoch für diesen zweiten Fall, wo der äussere Widerstand des Schliessungsbogens gering ist, an, dass wir auch den innern Widerstand unserer Batterie verringern, dadurch, dass wir mehrere Elemente »parallel« schalten, indem wir von mehreren Elementen alle Zinkplatten unter sich verbinden, und ebenso ihre Kupferpole (wie in Art. 181 vorgeschlagen wurde), so ergibt sich ein anderes, besseres Resultat. Angenommen, wir hätten auf diese Weise 4 Elemente mit einander verbunden. Ihre elektromotorische Kraft ist dann freilich nicht grösser als die eines einzigen Elements, dagegen ist ihr Widerstand nur der vierte Teil von demjenigen eines solchen Elements oder $\frac{1}{2}$ Ohm. Diese 4 Elemente würden bei einem äussern Widerstande von einem Ohm einen Strom von 666 Milli-Ampère liefern, denn wenn $E = 1$, $R = 1$ und $r = \frac{1}{2}$, so ist

$$C = \frac{E}{R + r} = \frac{2}{3} \text{ Ampère oder 666 Milli-Ampère.}$$

Digitized by Google

351. Beste Gruppierung der Elemente. Es leuchtet ohne weiteres ein, dass, wenn wir die Elemente einer Batterie in n Reihen von je m Elementen aufstellen (wo wir im ganzen $m \times n$ gleiche Elemente haben), die elektromotorische Kraft jeder Reihe das m fache der elektromotorischen Kraft jedes Elements beträgt, oder $m \,.\, E$; und dass der Widerstand jeder Reihe das m fache des Widerstandes jedes Elements ist, oder $m \,.\, r$. Da jedoch n parallele Reihen vorhanden sind, so ist der ganze innere Widerstand nur $\frac{1}{n}$ vom Widerstande einer einzigen Reihe, oder $= \frac{m}{n} \,.\, r$, folglich würde eine solche Batterie nach dem Ohm'schen Gesetze einen Strom C liefern, wo

$$C = \frac{m \,.\, E}{\frac{m}{n} \,.\, r + R}.$$

Es lässt sich mathematisch beweisen, dass wir bei einer gegebenen Batterie von Elementen, welche durch einen gegebenen äussern Widerstand R wirken sollen, die grösste Nutzwirkung erzielen, wenn wir m und n so wählen, *dass der innere Widerstand* $\left(\frac{m}{n} \,.\, r\right)$ *gleich dem äussern Widerstande R wird.* Der Leser würde gut daran thun, wenn er diese Regel durch Beispiele verifizierte und die Stromstärke für verschiedene Gruppierungen der Elemente berechnete. Obgleich diese Gruppierung den stärksten Strom liefert, ist sie doch nicht die sparsamste; denn ist der innere Widerstand gleich dem äussern, so ist die nützliche Arbeit, welche in dem äussern Schliessungsbogen verrichtet wird, ebenso gross, wie die nutzlose Arbeit, welche beim Erwärmen der Elemente verrichtet wird, so dass die Hälfte der Energie vergeudet wird. Die grösste Sparsamkeit wird erzielt, wenn der äussere Widerstand im Vergleich zum innern Widerstande sehr gross ist; nur wird in diesem Falle das Material der Batterie langsam aufgebraucht, und der Strom erreicht nicht das Maximum seiner Stärke.

352. Apparate mit Rollen von grossem und von kleinem Widerstande. Dem Leser wird es jetzt auch nicht schwer fallen zu verstehen, weshalb ein Galvanometer oder ein Elektromagnet mit Rolle von grossem Widerstande oder irgend ein Apparat, bei welchem der Leiter aus einem langen dünnen Drahte von hohem Widerstande besteht, sich nicht für einen Stromkreis eignen, wo sowohl R als auch r sehr klein sind. Der Leser wird ferner verstehen, weshalb bei Schliessungsbögen von grosser Länge, oder bei denen von Natur schon ein hoher Widerstand auftritt und eine Batterie von bedeutender elektromotorischer Kraft gebraucht wird, Apparate

Digitized by Google

mit Rollen von kleinem Widerstande wenig zu gebrauchen sind, denn obgleich sie die Widerstände nur wenig vergrössern, so reicht ihre geringe Zahl von Drahtwindungen bei den kleinen Strömen, welche in Schliessungsbögen von hohem Widerstande zirkulieren, nicht aus; und weshalb Apparate mit Rollen von grossem Widerstande hier geeignet sind, da sie die Wirkungen der Ströme durch ihre zahlreichen Windungen verstärken, während ihr Widerstand, obgleich unter Umständen ein grosser, die vorhandenen Widerstände des Schliessungsbogens nicht erheblich vermehrt. Ein Galvanometer mit einer Rolle von hohem Widerstande, welches als Nebenschluss zwischen 2 Punkten eines Schliessungsbogens eingeschaltet wird, erhält also einen Strom, welcher der Potentialdifferenz jener Punkte proportional ist. Daher kann ein solcher Apparat als *Voltmeter* benutzt werden (Art. 360 d).

353. Stromverzweigung. Wenn ein Stromleiter sich in einem Punkte A (Fig. 129) in zwei Zweige spaltet, welche sich bei B wieder vereinigen, so wird der Strom sich ebenfalls teilen, indem ein Teil durch diesen, der andere durch jenen Zweig fliesst. *Die relativen Stromstärken in den beiden Zweigen sind ihrer Leitungsfähigkeit proportional, d. h. umgekehrt proportional ihrem Widerstande.* Ist r z. B. ein Draht von 2 Ohm Widerstand, und r' von 3 Ohm, so verhält sich der Strom in r zu dem in r', wie r' zu r oder wie 3 : 2, oder $\frac{3}{5}$ des ganzen Stromes fliesst durch r und $\frac{2}{5}$ des ganzen Stromes durch r'.

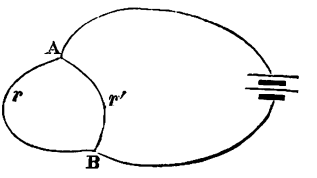

Fig. 129.

Der gesamte Widerstand des verzweigten Stromleiters zwischen A und B ist geringer, als der Widerstand jedes Zweiges einzeln, da der Strom sich jetzt einen der beiden Wege aussuchen kann. In der That ist die gesamte Leitungsfähigkeit gleich der Summe der beiden einzelnen Leitungsfähigkeiten. Nennen wir den gesamten Widerstand R, so folgt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} = \frac{r + r'}{rr'}, \text{ folglich}$$

$$R = \frac{rr'}{r + r'}$$

oder in Worten: *Der gesamte Widerstand eines verzweigten Leiters ist gleich dem Produkte der beiden einzelnen Widerstände, dividiert durch ihre Summe.*

Digitized by Google

Kirchhoff hat folgende wichtige Gesetze aufgestellt, welche sich beide aus dem Ohm'schen Gesetze ableiten lassen:

1) In jedem verzweigten Netzwerk von Drähten ist die algebraische Summe der Ströme in allen Drähten, welche in einem Punkte zusammentreffen, gleich Null.

2) Wirken mehrere elektromotorische Kräfte in verschiedenen Punkten eines Stromleiters, so ist die gesamte elektromotorische Kraft im ganzen Stromleiter gleich der Summe der Widerstände seiner einzelnen Teile, jeder derselben multipliziert mit der Stärke des Stromes, welcher durch denselben hindurchfliesst.

354. Ströme in Platten. Tritt der Strom in einen körperlichen Leiter ein, so fliesst derselbe nicht mehr längs einer Linie, sondern breitet sich aus und fliesst durch die Masse des Leiters. Wird ein Strom in eine dünne Platte aus leitender Materie geführt, so breitet sich derselbe zu einer »Stromplatte« aus und fliesst durch die Platte in Richtungen, welche von der Form der Platte und der Lage des Pols abhängen, durch welchen derselbe zur Batterie zurückkehrt. Werden z. B. Drähte von den beiden Polen einer Batterie in Berührung mit zwei benachbarten Punkten A und B in der Mitte einer sehr grossen flachen Scheibe von Zinnfolie gebracht, so fliesst der Strom durch die Folie von A nach B nicht in einer geraden Linie, sondern in krummen »Stromlinien«, welche von A aus nach allen Richtungen laufen und im Bogen nach B führen, in Kurven, die eine grosse Aehnlichkeit mit den »Kraftlinien« haben, welche vom N-Pole zum S-Pole eines Magnets führen (Fig. 50). Wird die Erde als zweiter Draht benutzt, um die Telegraphen-Ströme zu leiten (Fig. 160), so findet ein ähnliches Ausbreiten der Ströme in Stromplatten statt.

XXX. VORLESUNG: *Elektrische Messungen.*

355. Der Elektrotechniker hat elektrische Widerstände, elektromotorische Kräfte und die Kapazitäten von Kondensatoren zu messen. Jede dieser verschiedenen Grössen wird

Digitized by Google

gemessen durch Vergleichung mit gewissen Normal-Maassen, wobei jedoch die Methoden der Vergleichung so verschieden sind, dass wir uns auf eine ausführliche Beschreibung der Sache nicht einlassen können. Nur einige wenige Fälle können hier erklärt werden.

356. Messung des Widerstandes. Unter Widerstand verstehen wir dasjenige, was das Strömen der Elektrizität hemmt. Das Ohm'sche Gesetz zeigt uns, dass die Stärke eines Stromes, welcher durch eine elektromotorische Kraft entsteht, in demselben Verhältnis abnimmt, wie der Widerstand im Schliessungsbogen zunimmt.

a) Es ist daher möglich, zwei Widerstände mit einander zu vergleichen, indem wir ermitteln, in welchem Verhältnis jeder derselben den Strom einer konstanten Batterie schwächt. Nehmen wir z. B. an, wir hätten in Fig. 128 eine Normal-Batterie von einigen Daniell'schen Elementen, welche mit einem Drahte, dessen Widerstand R unbekannt, sowie mit einem Galvanometer den Stromkreis bilden; dann erhalten wir einen Strom von gewisser Stärke, welche von der eine bestimmte Ablenkung erfahrenden Galvanometernadel angezeigt wird. Entfernen wir den Draht R und ersetzen wir denselben in dem Schliessungsbogen durch Drähte, deren Widerstände wir kennen, so können wir durch Versuche einen solchen finden, welcher dieselbe Ablenkung der Galvanometernadel liefert, wenn er in die Strombahn eingeschaltet wird. Daraus erkennen wir dann, dass dieser Draht und der vorige, welchen wir R nannten, beide dem Strom denselben Widerstand bieten. Eine solche Vergleichung, welche wir eine *Substitutionsmethode* äquivalenter Widerstände nennen können, wurde von Wheatstone, Jacobi und andern weiter ausgeführt, welche den Vorschlag machten, als Normal-Widerstand einen langen dünnen Draht anzuwenden, der um einen hölzernen Cylinder gewunden ist, so dass jede gewünschte Länge des Normal-Drahtes in den Schliessungsbogen eingeschaltet werden kann, indem man eine entsprechende Anzahl von Drahtwindungen von dem Cylinder abwickelt oder

Digitized by Google

indem man in irgend einem verlangten Abstande vom Ende des Drahtes eine Berührung herstellt. Ein solcher Apparat war bekannt unter dem Namen **Rheostat**; derselbe ist jedoch heute durch die weiter unten beschriebenen Widerstandsrollen verdrängt.

b) Die oben angegebene Methode lässt sich mit jedem Galvanometer von hinreichender Empfindlichkeit ausführen; steht jedoch ein Tangentengalvanometer zu Gebote, so kann der Versuch durch Berechnung abgekürzt werden. Angenommen es sei ein Tangentengalvanometer und ein unbekannter Widerstand R in den Schliessungsbogen eingeschaltet, wie in Fig. 128, und der Strom sei stark genug, um eine Ablenkung von δ Graden hervorzubringen. Dann ersetzen wir R durch einen bekannten Widerstand R', welcher die Ablenkung δ' liefert; vorausgesetzt, dass die andern Widerstände des Schliessungsbogens vernachlässigt werden dürfen, folgt dann, dass, da die Stromstärken zu tan δ und tan δ' proportional sind, der Widerstand R aus der umgekehrten Proportion

$$\tan \delta : \tan \delta' = R' : R$$

berechnet werden kann.

c) Mit Hilfe eines Differentialgalvanometers (Art. 203) und eines Satzes von Normal-Widerstandsrollen ist es leicht, den Widerstand eines Leiters zu messen. Angenommen, der Stromleiter teile sich in zwei Zweige, so dass ein Teil des Stromes durch den unbekannten Widerstand und um die eine Abteilung der Galvanometerrollen fliesst, der andere Teil des Stromes durch die bekannten Widerstände und dann um die andere Abteilung der Rollen in entgegengesetzter Richtung. Ist es uns gelungen, in dem zweiten Zweige einen der bekannten Widerstände einzuschalten, welcher dem unbekannten Widerstande gleich ist, so sind die Ströme in beiden Zweigen einander gleich und die Nadel des Differentialgalvanometers zeigt dann keine Ablenkung. Bei einem genauen Apparate ist diese Nullmethode sehr zuverlässig.

d) Die beste Methode aller Widerstandsmessungen ist je-

Digitized by Google

doch diejenige, welche ausser einem Satze von Normal-Widerstandsrollen noch den wichtigen Apparat anwendet, welcher unter dem Namen der Wheatstone'schen Brücke bekannt ist und der weiter unten in Art. 358 beschrieben werden soll.

e) Um sehr grosse Widerstände zu messen, können wir in der Weise verfahren, dass wir mit Hilfe einer Normal-Batterie einen Kondensator für eine bestimmte Zeit durch den Widerstand hindurch laden und dann die angesammelte Ladung dadurch ermitteln, dass wir dieselbe durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 204) entladen.

357. Potentialabfall längs eines Drahtes. Zum Verständnis der Wheatstone'schen Brücke ist es nötig, dass wir folgende Bemerkung vorausschicken. Wenn das elektrische Potential verschiedener Punkte eines Stromleiters mit Hilfe eines Elektrometers untersucht wird, wie in Art. 263 auseinandergesetzt wurde, so ergibt sich, dass das Potential längs des ganzen Stromleiters vom + Pole der Batterie, wo es am grössten ist, bis zum — Pole, wo es am kleinsten ist, abnimmt. Besteht der Stromleiter aus einem Drahte von gleichmässiger Dicke, der also dem Strome einen gleichmässigen Widerstand bietet, so ergibt sich, dass das Potential gleichmässig fällt; bietet jedoch ein Teil des Stromleiters einen grössern Widerstand als ein anderer Teil, so ergibt sich, dass das Potential am schnellsten längs des Leiters von grösserm Widerstande fällt. Doch ist in jedem Falle das Sinken des Potentials zwischen zwei Punkten dem Widerstande zwischen diesen beiden Punkten proportional; und wir wissen z. B., dass, wenn wir um den Stromleiter herumgehen bis zu einem Punkte, wo das Potential um die Hälfte seines Wertes gefallen ist, der Strom bis zu jenem Punkte die Hälfte der Widerstände überwunden hat.

358. Wheatstone's Brücke. Dieser Apparat, der von Christie angegeben und von Wheatstone zur Messung von Widerständen angewendet wurde, besteht aus einem System von Leitern, deren Diagramm Fig. 130 zeigt. Der Stromleiter einer konstanten Batterie spaltet sich im Punkte P in zwei Teile,

Digitized by Google

welche sich in Q wieder vereinigen, so dass ein Teil des Stromes durch M, der andere durch N fliesst. Die vier Konduktoren D, C, B, A heissen die »Zweige« der »Brücke«; aus der

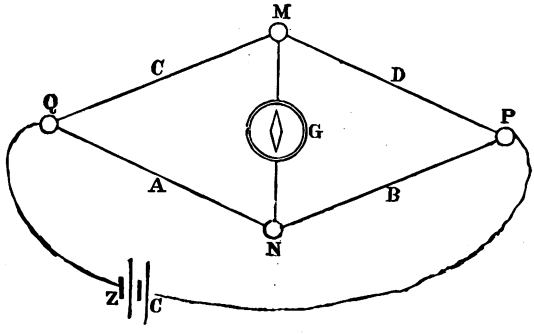

Fig. 130.

Proportion, welche zwischen ihren Widerständen besteht, lässt sich der Widerstand eines derselben berechnen, wenn die Widerstände der 3 andern bekannt sind. Wenn der Strom, welcher vom Punkte C der Batterie ausgeht, in P ankommt, so ist das Potential bis auf einen gewissen Wert gesunken. Das Potential des Stromes in dem obern Zweige fällt bis M und von da weiter bis zum Punkte Q. Das Potential des untern Zweiges fällt bis N und von da weiter, bis es den Wert im Punkte Q erreicht. Hat nun N denselben verhältnismässigen Abstand längs der Widerstände zwischen P und Q, wie M längs der Widerstände der untern Linie zwischen P und Q, so ist das Potential in N auf denselben Wert herabgesunken, wie in M; oder mit andern Worten: Ist das Verhältnis des Widerstandes C zum Widerstande D gleich dem Verhältnis des Widerstandes A zum Widerstande B, so haben M und N gleiches Potential. Um zu untersuchen, ob beide Punkte gleiches Potential haben, stellt man zwischen M und N in einem Verbindungsdrahte ein empfindliches Galvanometer auf; dasselbe zeigt keine Ablenkung, wenn M und N gleiches Potential haben; oder wenn die vier

Digitized by Google

Widerstände der Zweige einander das »Gleichgewicht« halten, so dass die Proportion besteht:

$$A : C = B : D.$$

Kennen wir die Werte A, B und C, so lässt sich D berechnen, denn:

$$D = \frac{B \times C}{A}.$$

Beispiel: Ist A = 10 Ohm, C = 100 Ohm und B = 15 Ohm (wie in Fig. 133), so ist $D = \frac{15 \times 100}{10} = 150$ Ohm.

359. Widerstandsrollen. Drähte von einem Normal-Widerstande werden jetzt von Mechanikern unter dem Namen von **Widerstandsrollen** verkauft. Sie bestehen aus Rollen von Argentan (vergl. Art. 349) (oder bisweilen aus einer Legierung von Silber und Iridium), welche sehr sorgfältig gewunden sind und eine solche Länge haben, dass ihr Widerstand gleich einer bestimmten Anzahl *Ohm* ist. Um Selbstinduktion und die dadurch entstehenden Funken (vergl. Art. 404) beim Oeffnen oder Schliessen des Stromes zu vermeiden, sind sie auf besondere Art gewunden, wie es die Fig. 131 angibt, indem jeder Draht (welcher mit Seide oder mit in Paraffin getränkter Baumwolle umwickelt ist) doppelt gelegt wird, ehe derselbe zur Spirale gewunden wird. Beide Enden einer Spirale werden jede an ein festes Messingstück gelötet, wie Spirale 1 an A und B, Spirale 2 an B und C; die Messingstücke selbst werden an einem Block von Ebonit befestigt (welcher den Deckel des »Widerstandskastens« bildet), so dass zwischen denselben ein genügender Raum bleibt für die Einschaltung starker, gut passender konischer Messingstöpsel. Fig. 132 zeigt einen kompletten Widerstandskasten, welcher zu elektrischen Versuchen geeignet ist, mit den Stöpseln an ihren Plätzen. So lange die Stöpsel eingesteckt bleiben, fliesst der Strom durch die festen

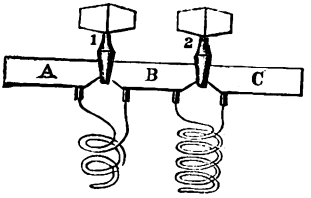

Fig. 131.

Digitized by Google

Messingstücke und Stöpsel, ohne auf einen grössern Widerstand zu stossen; wird jedoch ein Stöpsel herausgezogen, so kann der Strom von dem einen Messingstücke zum andern nur durch

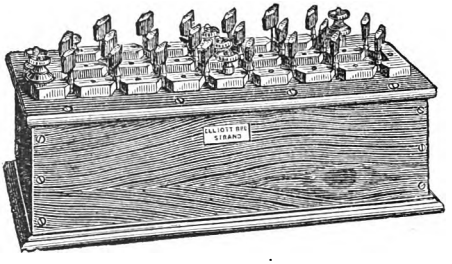

Fig. 132.

die auf diese Weise in den Stromleiter eingeschaltete Spirale fliessen. Die Reihe der gewählten Spiralen beträgt gewöhnlich folgende in Ohm ausgedrückten Widerstände: 1, 2, 2, 5; 10, 20, 20, 50; 100, 200, 200, 500; .... bis zu 10,000 Ohm. Indem man einen Stöpsel herauszieht, kann man jede beliebige Spirale in den Stromleiter einschalten, und jede gewünschte Zahl, bis zu 20,000 erreichen, wenn man mehrere Stöpsel herauszieht; so z. B. kann man einen Widerstand von 263 Ohm aus 200 + 50 + 10 + 2 + 1 bilden.

Gewöhnlich werden Wheatstone'sche Brücken in der Weise konstruiert, dass die Arme A und C mehrere Widerstandsrollen haben, und der Arm B mit einem kompletten Satze versehen ist. Der Nutzen dieser Anordnung besteht darin, dass wir durch Einstellung von A und C das Verhältnis zwischen B und D bestimmen und in gewissen Fällen bis auf Bruchteile eines Ohms messen können. Fig. 133 zeigt ein vollständigeres Schema, wo Widerstände von 10, 100 und 1000 Ohm in die Arme A und C eingeschaltet sind.

Beispiel. Angenommen, wir hätten einen Draht, dessen Widerstand, wie wir wüssten, zwischen 46 und 47 Ohm liegt, und wir wollten den Bruchteil eines Ohm messen, so müssten wir den Draht in D einschalten und A = 100 Ohm und C

Digitized by Google

= 10 Ohm machen; in diesem Falle würde dem Arme D ein Widerstand in B, welcher das 10fache des Drahtes D wäre, das Gleichgewicht halten. Hätten wir diesen durch den Versuch

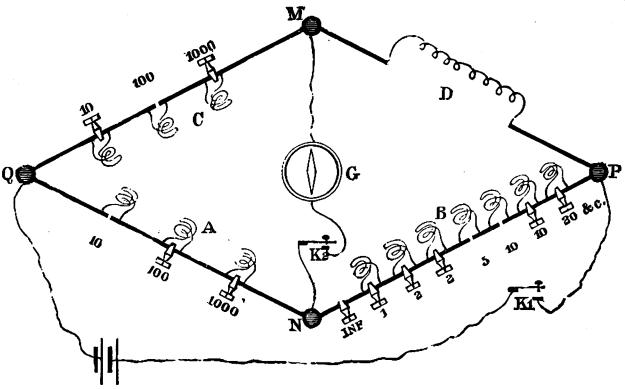

Fig. 133.

auf 464 Ohm geschätzt, so wissen wir, dass D = 464 × 10 : 100 = 46,4 Ohm.

In der Praxis erhält die Brücke selten oder gar nicht die Rhombengestalt der Diagramme. Der Widerstandskasten Fig. 132 ist an und für sich eine vollständige »Brücke«, indem die geeigneten Verbindungen durch Schrauben an verschiedenen Stellen hergestellt werden. Beim Gebrauche der Brücke sollte der Stromkreis der Batterie stets dadurch vervollständigt werden, dass der Schlüssel K_1 herabgedrückt wird, bevor der Schlüssel K_2 des Galvanometers herabgedrückt wird, um eine plötzliche heftige Ablenkung der Galvanometernadel zu vermeiden, welche beim Schliessen des Stromleiters in Folge der Selbst-Induktion auftritt (Art. 404).

360. Messung der elektromotorischen Kraft. Da es keine einfache absolute Methode zur Messung elektromotorischer Kräfte gibt, so werden dieselben gewöhnlich in *relativer* Weise gemessen, indem sie mit der elektromotorischen Kraft eines Normal-Elementes, wie z. B. eines Daniell'schen (Art. 170)

Digitized by Google

oder noch besser eines von Latimer Clark (Art. 177) verglichen werden. Die Methoden der Vergleichung sind mannigfach; hier sollen nur 4 derselben angeführt werden:

a) Es sei E die zu messende elektromotorische Kraft der Batterie und E' diejenige einer Normalbatterie. Dann verbinde man E mit einem Galvanometer, an welchem bei einem bestimmten Widerstande des Stromleiters eine Ablenkung von δ_1 Graden hervorgebracht werde; dann schalte man noch den Widerstand r ein, um die Ablenkung auf δ_2 Grade zu reduzieren — etwa 10 Grade weniger als vorher. Nun ersetze man im Stromleiter E durch die Normalbatterie und richte die Widerstände so ein, dass wieder wie vorher, die Ablenkung δ_1 beträgt, und vermehre endlich den Widerstand um r', um die Ablenkung auf δ_2 zu reduzieren. Dann ist:

$$r' : r = E' : E,$$

da die Widerstände, welche die Stromstärke gleichmässig reduzieren, den elektromotorischen Kräften proportional sind.

b) Werden die Pole einer Normalbatterie durch einen langen dünnen Draht verbunden, so fällt das Potential gleichmässig vom + Pole bis zum — Pole. Wenn wir daher an dem einen Pole und in einem Punkte, welcher sich in einem beliebigen Abstande auf dem Drahte befindet, Kontakte herstellen, so können wir einen beliebigen Bruchteil der ganzen elektromotorischen Kraft betrachten. Dieser Bruchteil lässt sich mit der elektromotorischen Kraft einer beliebigen andern Batterie vergleichen oder kann zur Vergleichung der Differenz zwischen den elektromotorischen Kräften zweier verschiedener Elemente benutzt werden.

c) Die elektromotorische Kraft einer Batterie kann direkt als Potentialdifferenz durch ein Quadrantelektrometer gemessen werden. In diesem Falle ist der Stromleiter nie geschlossen, und es fliesst kein Strom.

d) Wird ein Galvanometer so angefertigt, dass der Widerstand seiner Rollen mehrere 1000 Ohm beträgt, wogegen der innere Widerstand einer Batterie oder einer Dynamomaschine nicht in Betracht kommt, so kann ein solches Galvanometer dazu dienen, elektromotorische Kräfte zu messen; denn nach dem Ohm'schen Gesetze hängt die Stärke des Stromes, welchen eine solche Batterie oder Dynamomaschine hindurchsenden kann, bloss von der elektromotorischen Kraft an den Enden der Rolle ab. Ein solches Galvanometer, in geeigneter Weise graduiert, wird bisweilen ein »*Voltmeter*« oder »*Potentialgalvanometer*« genannt. Dasselbe kann dazu benutzt werden, die Potentialdifferenz zwischen 2 beliebigen Punkten eines Stromleiters zu bestimmen, indem man seine Enden als Nebenschluss mit dem Stromleiter an diesen beiden Punkten verbindet.

Digitized by Google

361. Messung des innern Widerstandes einer Batterie. Hierbei kann man in 3facher Weise verfahren:

a) Mittelst eines Tangentengalvanometers wird die Stromstärke bestimmt, zuerst, wenn der Widerstand des äussern Stromleiters klein ist; und zweitens, wenn ein grösserer bekannter äusserer Widerstand eingeschaltet wird. Hieraus kann das Verhältnis zwischen dem innern Widerstande und dem eingeschalteten äussern Widerstande berechnet werden.

b) *Methode der Gegenschaltung.* Man nehme zwei gleiche Elemente und vereinige dieselben so, dass sie keinen Strom erzeugen. Dann messe man ihren vereinigten Widerstand in derselben Weise, wie der Widerstand eines Drahtes gemessen wird. Der Widerstand eines Elementes ist dann die Hälfte des Widerstandes beider.

c) *Mance's Methode.* Man stelle das Element selbst in einen Arm der Wheatstone'schen Brücke und setze an die Stelle, wo die Batterie gewöhnlich ist, einen Schlüssel, richte die Widerstände derart ein, dass die permanente Galvanometer-Ablenkung dieselbe ist, gleichviel ob der Schlüssel herabgedrückt ist oder nicht. Ist diese Bedingung erfüllt, so ist der Widerstand der Batterie aus demjenigen der drei andern Zweige nach der gewöhnlichen Formel zu berechnen. *(Diese Methode ist nicht sehr zuverlässig.)*

362. Messung der Kapazität eines Kondensators. Die Kapazität eines Kondensators lässt sich messen, indem dieselbe mit der Kapazität eines Normal-Kondensators verglichen wird, — z. B. mit der Kapazität des $\frac{1}{3}$ Mikrofarad-Kondensators in Fig. 106 — und zwar nach einer der folgenden Methoden:

a) Man lade den Kondensator, dessen Kapazität unbekannt, bis auf ein bestimmtes Potential; dann lasse man einen Teil dieser Ladung auf einen Kondensator von bekannter Kapazität übergehen und messe das Potential, bis auf welches die Ladung sinkt; dann berechne man die ursprüngliche Kapazität, welche sich zu der Gesamt-Kapazität beider Kondensatoren ebenso verhält, wie das letzte Potential zum ursprünglichen.

b) Man lade beide Kondensatoren auf gleiche Potentialdifferenzen und entlade dann einen nach dem andern durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 204), wo der Sinus des halben Winkels der ersten Nadelschwingung in jedem Falle der Ladung, und daher auch der Kapazität proportional ist.

c) Man lade die beiden Kondensatoren gleichzeitig durch

Digitized by Google

den einen Pol derselben Batterie, indem man in jedem Zweige hohe Widerstände einschaltet, in der Weise, dass das Potential in beiden auf dieselbe Höhe steigt; dann sind die Kapazitäten den Widerständen, durch welche sie geladen wurden, umgekehrt proportional.

d) Eine andere Methode, welche keinen Normal-Kondensator erfordert, ist folgende: — Man lasse den Kondensator, dessen Kapazität gemessen werden soll, sich langsam durch einen Draht von sehr grossem Widerstande entladen. Die Zeit, in welcher das Potential auf einen gewissen gegebenen Bruchteil seines ursprünglichen Wertes fällt, ist dem Widerstande, der Kapazität und dem Logarithmus des gegebenen Bruches proportional.

363. Der Widerstand als Geschwindigkeit ausgedrückt. Aus der Tabelle über die »Dimensionen« der elektromagnetischen Einheiten (Art. 324) ersehen wir, dass die Dimensionen des Widerstandes durch LT^{-1} gegeben sind; das sind aber dieselben Dimensionen, wie die der Geschwindigkeit. Jeder Widerstand kann als **Geschwindigkeit** ausgedrückt werden. Folgende Betrachtungen werden den Leser in den Stand setzen, sich hiervon eine physikalische Vorstellung zu verschaffen: — Angenommen, wir hätten einen Stromleiter, welcher aus zwei horizontalen Schienen CS und D'T besteht (Fig. 134), die einen Abstand von einem Zentimeter haben, durch CD ver-

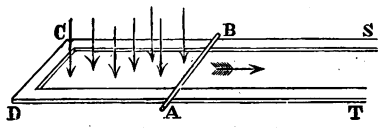

Fig. 134.

bunden und durch ein Gleitholz AB vervollständigt sind. Dieser veränderliche Stromleiter befinde sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde von der Intensität 1, und die Kraftlinien seien senkrecht nach unten durch den Stromleiter gerichtet. Wird nun das Gleitholz nach ST mit einer Geschwindigkeit von n Zentimetern pro Sekunde bewegt, so wird die Zahl der hinzutretenden Kraftlinien, welche vom Stromleiter eingeschlossen werden, im Verhältnis n pro Sekunde zunehmen; oder mit andern Worten, es tritt eine induzierte elektromotorische Kraft (Art. 394) auf, welche dem Stromleiter eingepresst wird, und welche einen durch das Gleitholz von A nach B fliessenden Strom veranlasst. Sind die Schienen ohne Widerstand, so

Digitized by Google

hängt die Stromstärke von dem Widerstande AB ab. Nun bewege sich AB mit solcher Geschwindigkeit, dass der Strom die Stärke 1 erhält. Ist sein Widerstand eine »absolute« (elektromagnetische) Einheit, so braucht es sich bloss mit einer Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde zu bewegen. Ist sein Widerstand grösser, so muss es sich mit einer entsprechend grössern Geschwindigkeit bewegen; da die Geschwindigkeit, mit welcher es sich bewegen muss, um einen Strom von der Stärke 1 zu unterhalten, numerisch seinem Widerstande gleich ist. *Der als »ein Ohm« bekannte Widerstand ist gleich 10^9 absoluten elektromagnetischen Einheiten, und wird daher durch eine Geschwindigkeit von 10^9 Zentimetern oder 10 Millionen Metern* (= einem Erdquadranten) *pro Sekunde dargestellt.*

364. Bestimmung des Ohm. Der Wert des Ohm in absolutem Maasse wurde von einem Komitee der British Association in London im Jahre 1863 bestimmt. Da es praktisch unausführbar war, einem horizontalen Gleitholz eine so grosse Geschwindigkeit zu erteilen, wie nötig war, so wurde die Geschwindigkeit, welche dem Widerstande eines Drahtes entsprach, auf folgende Weise gemessen: Ein ringförmiger Draht (von vielen Windungen), der um eine vertikale Achse drehbar ist (Fig. 135), wurde in sehr schnelle gleichförmige Umdrehung versetzt. Ein solcher Ring durchschneidet beim Rotieren die Kraftlinien des Erdmagnetismus. In der nördlichen Hälfte des Ringes wird, während sie sich von Westen nach Osten bewegt, ein aufwärts gehender Strom induziert (vergl. die Regel Art. 395), wogegen in der südlichen Hälfte beim Rotieren von Osten nach Westen ein abwärts gehender Strom induziert wird. Daher wirkt der rotierende Ring während der Drehung als sein eigenes Galvanometer, wenn ein kleiner Magnet in seine Mitte gehängt wird; da der Einfluss des Magnetismus, welcher von dem rotierenden Ringe herrührt, der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus, der Rotationsgeschwindigkeit und der Anzahl der Drahtwindungen des Ringes direkt, und dem Widerstande des Drahtes umgekehrt proportional ist. Da also alle andern Data bekannt sind, so lässt sich der Widerstand berechnen und *als Geschwindigkeit* messen. Die vorhandenen *Ohm oder B. A. Einheiten* wurden durch Vergleich mit diesem rotierenden Ringe gemessen; da man jedoch in Zweifel darüber war, ob die B. A. Einheit wirklich 10^9 Zentimeter pro Sekunde darstellt, so wurde im Jahre 1880 eine abermalige Bestimmung des Ohm von dem Komitee der British Association vorgenommen.

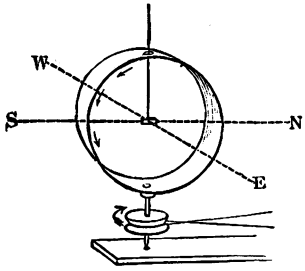

Fig. 135.

364a. Das gesetzliche Ohm. Auf dem internationalen elektrischen

Digitized by Google

Kongress in Paris im Jahre 1881 wurde die Widerbestimmung des Ohm beschlossen und man kam auch überein, die praktischen Normal-Maasse nicht mehr aus Argentandraht anzufertigen, sondern nach dem ursprünglich von Siemens gemachten Vorschlage, das praktische Ohm als den Widerstand einer Säule reinen Quecksilbers von bestimmter Länge und einem Millimeter Querschnitt zu definieren. Die ursprüngliche »Siemens'sche Einheit« war eine Quecksilbersäule von einem Meter Länge und einem Quadratmillimeter Querschnitt und betrug etwas weniger als ein Ohm (0,9415 B. A. Einheiten). Nachdem die ersten Physiker Europa's Messungen angestellt hatten, bestimmte der Pariser Kongress von 1884, dass die Quecksilbersäule, welche das gesetzliche Ohm darstellt, eine Länge von 106 Zentimetern haben soll.

Anmerkung über das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten.

365. Wenn der Leser die Tabelle der Dimensionen der elektrostatischen Einheiten des Art. 258 mit derjenigen der Dimensionen der elektromagnetischen Einheiten des Art. 324 vergleicht, so wird er bemerken, dass in beiden Systemen die den gleichen Einheiten erteilten Dimensionen nicht dieselben sind. So sind z. B. die Dimensionen der »Menge« im elektrostatischen Maass $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$ und im elektromagnetischen Maass $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$. Indem wir beides durch einander dividieren, ergibt sich LT^{-1}, eine Grösse, welche wir sogleich als eine Geschwindigkeit erkennen. Diese Geschwindigkeit tritt in jedem Falle bei dem Verhältnis des elektrostatischen zum elektromagnetischen Maasse jeder Einheit auf. Sie ist eine bestimmte konkrete Geschwindigkeit, und stellt diejenige Geschwindigkeit dar, mit welcher sich zwei elektrische Teilchen neben einander bewegen müssen, damit ihre gegenseitige elektromagnetische Anziehung (als gleichbedeutend mit der Bewegung zweier parallelen Ströme genommen) gerade ihrer gegenseitigen elektrischen Abstossung gleichkomme (vergl. Art. 337). Diese Geschwindigkeit v, welche in der elektromagnetischen Theorie des Lichts (Art. 390) von grosser Wichtigkeit ist, ist in verschiedener Weise gemessen worden.

Einheit.	Elektrostatische.	Elektromagnetische.	Verhältnis.
Menge . .	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$	$L T^{-1} = v$
Potential . .	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$	$L^{-1} T = \frac{1}{v}$
Kapazität .	L	$L^{-1} T^2$	$L^2 T^{-2} = v^2$
Widerstand .	$L^{-1} T$	LT^{-1}	$L^{-2} T^2 = \frac{1}{v^2}$

Digitized by Google

a) Weber und Kohlrausch maassen die elektrostatische Mengeneinheit und verglichen dieselbe mit der elektromagnetischen Mengeneinheit, und fanden für das Verhältnis v den Werth $3{,}1074 \times 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde.

b) W. Thomson verglich die beiden Potentialeinheiten und fand

$$v = 2{,}825 \times 10^{10}$$

und später $v = 2{,}93 \times 10^{10}$.

c) Clerk Maxwell hielt einer elektrostatischen Anziehungskraft das Gleichgewicht durch eine elektromagnetische Abstossungskraft und fand

$$v = 2{,}88 \times 10^{10}.$$

d) Ayrton und Perry maassen die Kapazität eines Kondensators auf elektromagnetischem Wege, indem sie denselben in ein ballistisches Galvanometer entluden, und auf elektrostatischem Wege, indem sie die Kapazität aus seiner Grösse berechneten und fanden

$$v = 2{,}980 \times 10^{10}.$$

e) Joseph J. Thomson verglich die Kapazität eines Kondensators, welche auf elektrostatischem Wege berechnet war, mit der Kapazität desselben Kondensators, welche er auf elektromagnetischem Wege an einer Wheatstone-Brücke gemessen hatte, und fand [1])

$$v = 2{,}963 \times 10^{10}.$$

Die Geschwindigkeit des Lichtes wird zu $2{,}9992 \times 10^{10}$ angenommen oder nach G. Forbes' letzter Bestimmung ist die Geschwindigkeit des roten Lichtes $2{,}9826 \times 10^{10}$.

---

1) Anm. des Uebers. Eine vollständigere Zusammenstellung findet man in G. Wiedemann's Elektrizität. Bd. IV. pag. 1004.

Digitized by Google

KAPITEL VII.

WÄRME, LICHT UND ARBEIT ERZEUGT DURCH ELEKTRISCHE STRÖME.

XXXI. VORLESUNG: *Wärmewirkungen der Ströme.*

366. Wärme und Widerstand. Ein Strom kann Arbeit verschiedener Art verrichten, chemische, magnetische, mechanische und Wärmearbeit. Ueberall, wo ein Strom Arbeit verrichtet, wird dieselbe auf Kosten eines Teiles der Energie des Stromes verrichtet. Wir haben gesehen, dass der von einer gegebenen Batterie erzeugte Strom nach dem Ohm'schen Gesetze durch jede Vermehrung des äussern Widerstandes geschwächt wird. Aber die Stromstärke kann auch in gewissen Fällen durch eine andere Ursache verringert werden, nämlich durch das Auftreten einer entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft an irgend einer Stelle des Stromleiters. Wenn z. B. ein Strom durch ein Voltameter hindurchgeht (Art. 214), so tritt in Folge des Widerstandes des Voltameters selbst eine Schwächung ein, und eine weitere Abnahme in Folge der entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft (gewöhnlich als »Polarisation« bezeichnet) welche entsteht, während die chemische Arbeit verrichtet wird. Ebenso, wenn ein Strom dazu benutzt wird, einen elektromagnetischen Motor (Art. 375) zu treiben, erzeugt die Rotation des Motors selbst einen rückwärts gehenden Strom, welcher die Stromstärke vermindert. Jeder Strom jedoch, welcher auf diese Weise nicht zur äussern Arbeit verwendet wird,

Digitized by Google

wird in Wärme umgesetzt, sei es innerhalb der Batterie, oder in einem Teile des Stromleiters oder in beiden. Nehmen wir an, eine Elektrizitätsmenge würde in einem geschlossenen Stromleiter in Bewegung gesetzt. Wenn kein Widerstand vorhanden, der sie hemmte, so würde dieselbe für ewige Zeiten zirkulieren, gerade so wie ein Eisenbahnwagen, der längs eines kreisförmigen Schienenstrangs in Bewegung gesetzt ist, ohne Aufhören im Kreise herumfahren würde, wenn derselbe nicht in Folge der Reibung zur Ruhe käme. Wenn ein in Bewegung befindlicher Körper in Folge der Reibung gehemmt wird, so wird die Energie seiner Bewegung durch die Reibung in Wärme umgesetzt. Wenn eine in Bewegung befindliche Elektrizitätsmenge durch einen Widerstand gehemmt wird, so wird die Energie ihrer Bewegung durch den Widerstand in Wärme umgesetzt. Wärme tritt in der That überall da auf, wo der Stromleiter dem Strome einen Widerstand entgegenstellt. Werden die Enden einer Batterie durch einen kurzen, dicken Draht von geringem Widerstande verbunden, so wird der grösste Teil der Wärme in der Batterie entwickelt; wird aber ein dünner Draht von bedeutendem Widerstande in dem äussern Stromleiter eingeschaltet, so erwärmt sich derselbe, während die Batterie selbst verhältnismässig kühl bleibt.

367. Gesetze der Wärmeentwicklung; das Joule'sche Gesetz. Um die Wärmeentwicklung durch einen Strom zu untersuchen, verwendeten Joule und Lenz Apparate wie in Fig. 136, bei denen ein dünner, zwei dicke Leiter verbindender Draht sich innerhalb eines mit Alkohol gefüllten Glasgefässes befindet, in welches ein Thermometer taucht. Da der Widerstand des Drahtes bekannt ist, so kann sein Verhältnis zu den andern Widerständen berechnet werden. Joule fand, dass *die Zahl der*

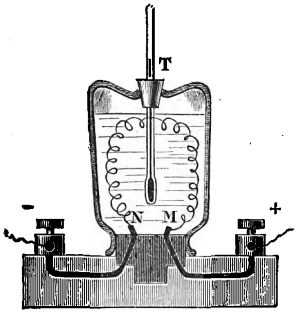

Fig. 136.

Digitized by Google

Wärmeeinheiten, welche in einem Leiter entwickelt werden, proportional ist:

1) seinem Widerstande;
2) dem Quadrate der Stromstärke; und
3) der Zeit, während welcher der Strom fliesst.

Die Gleichung, welche diese Beziehungen ausdrückt, ist unter dem Namen des Joule'schen Gesetzes bekannt und lautet

$$H = C^2 . R . t \times 0{,}24$$

wo C die Stromstärke in Ampère, R den Widerstand in Ohm, t die Zeit in Sekunden, und H die Wärme in der gewöhnlichen Einheit der Wärmemenge bedeuten, nämlich diejenige Wärmemenge, welche ein Gramm Wasser um 1^0 C. erwärmt. (Art. 255.)

Das Joule'sche Gesetz können wir durch folgende Rechnung ableiten. Die Arbeit W, welche von einem Strome verrichtet wird, um Q elektrische Einheiten durch eine Potentialdifferenz $V_2 - V_1$ zu bewegen, ist:

$$W = Q (V_2 - V_1);$$

und da $Q = Ct$, und $V_2 - V_1 = E$, und $W = J . H$ (wo J das mechanische Wärme-Aequivalent $4{,}2 \times 10^7$ und H die Wärme in Wasser-Grammhundertteiligen Gradeinheiten bedeuten), so ist

$$J.H = CtE \text{ oder, da } E = C.R$$
$$J.H = C^2Rt,$$

folglich

$$H = \frac{C^2 . Rt}{J}.$$

Da aber C und R hier »absolute« Einheiten sind, so müssen wir sie mit $10^{-2} \times 10^9 = 10^7$ multiplizieren, um dieselben auf den gewöhnlichen Fall von Ampère und Ohm zu reduzieren, folglich

$$H = \frac{C^2Rt}{4{,}2} = C^2R . t \times 0{,}24.$$

Dies ist gleichbedeutend mit dem Satze, dass *ein Strom von einem Ampère, welcher durch einen Widerstand von einem Ohm fliesst, hierin 0,24 Wärmeeinheiten pro Sekunde entwickelt.*

Dr. Siemens macht den Vorschlag, diese Wärmemenge (oder ihr mechanisches Arbeitsäquivalent) ein Joule zu nennen. Hiernach wäre die elektrische Wärmeeinheit, das Joule, nur 0,24tel einer gewöhnlichen Wärmeeinheit oder Calorie (Art. 255) und eine Calorie = 4,2 Joule.

Das zweite der obigen Gesetze, dass die Wärme, falls die übrigen Grössen einander gleich sind, dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, überrascht bisweilen jüngere Leser, welche erwarten, dass die Wärme

Digitized by Google

einfach dem Strome proportional ist. Dann möge daran erinnert sein, dass der Verbrauch an Zink ebenfalls dem Quadrate des Stromes proportional ist, die übrigen Grössen als gleich vorausgesetzt; denn nehmen wir an, dass wir den Strom, welcher sich durch einen hohen Widerstand arbeitet (so dass alle Wärme ausserhalb der Batterie entwickelt wird) verdoppeln, indem wir die Zahl der Elemente der Batterie verdoppeln, so wird in jedem Elemente die doppelte Portion Zink verbraucht, wie vorher, und da wir doppelt so viel Elemente haben, wie anfangs, so ist der Verbrauch an Zink viermal so gross, wie vorher.

368. Favre's Versuche. Favre stellte eine Reihe von äusserst wichtigen Versuchen an über das Verhältnis der Energie eines Stromes zu der von ihm entwickelten Wärme. Er wies nach, dass die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten = 18,682, wenn 33 Gramm (1 Aequivalent) Zink in verdünnter Schwefelsäure aufgelöst werden (aus welcher Wasserstoff ausgeschieden wird). Er gelangte zu dieser Zahl, indem er den Prozess sich in einem Gefässe vollziehen liess, welches sich in einer Höhlung seines Calorimeters befand, eines Apparates, der einem sehr grossen mit Quecksilber gefüllten Thermometer glich, dessen Ausdehnung der ihm mitgeteilten Wärme proportional war. Wurde ein Smee'sches Element in denselben Apparat eingeführt, so beobachtete er, dass die Auflösung derselben Zinkmenge von der Entwicklung von 18,674 Wärmeeinheiten begleitet war (also einer mit der früher beobachteten Menge fast gleichen) und diese Menge war dieselbe, gleichviel ob die Entwicklung in dem Elemente der Batterie stattfand, wenn der Stromkreis durch einen kurzen, dicken Draht geschlossen war, oder ob dieselbe in einem langen, dünnen Drahte stattfand, der in den äussern Stromkreis eingeschaltet war. Er stellte alsdann 5 Smee'sche Elemente hinter einander, in Hohlräume des Calorimeters und sandte ihren Strom um eine kleine elektromagnetische Maschine. Die während der Auflösung von 33 Gramm Zink sich entwickelnde Wärmemenge wurde dann in 3 Fällen beobachtet: 1) wenn die Maschine in Ruhe war; 2) wenn die Maschine in Bewegung war, jedoch weiter keine Arbeit verrichtete, als dass sie die Reibung an ihren Achsen überwand; 3) wenn die Maschine dazu benutzt wurde 13,124,000 Gramm-Zentimeter ($= 12{,}874 \times 10^6$ Erg) Arbeit zu verrichten, indem sie ein Gewicht an einer über eine Rolle führenden Schnur emporhob. Die Wärmemengen, welche in dem Stromleiter in diesen 3 Fällen entwickelt wurden, waren 18,667 und 18,657 und 18,374 Einheiten. Im letzten Falle erklärt sich die Abnahme der im Stromleiter erzeugten Wärme durch die verrichtete Arbeit. Addieren wir das Wärmeäquivalent der verrichteten Arbeit zu der im letzten Falle entwickelten Wärmemenge, so müssten wir denselben Wert, wie vorher, erhalten. Indem wir die $12{,}874 \times 10^6$ Erg der Arbeit durch das mechanische Wärmeäquivalent dividieren, ausgedrückt in »absolutem« Maasse (42×10^6), so erhalten wir als das Wärmeäquivalent

Digitized by Google

der verrichteten Arbeit 306 Wärmeeinheiten. Nun ist 18,374 + 306 = 18,680, eine Grösse, welche mit derjenigen der ersten Beobachtung fast identisch ist, und vollständig innerhalb der Grenzen unvermeidlicher experimenteller Fehler liegt.

369. Temperaturerhöhung. Die Erhöhung der Temperatur eines Widerstand leistenden Drahtes hängt von der *Natur* des Widerstandes ab. Ein kurzer dünner Draht kann genau so grossen Widerstand bieten als ein langer dicker Draht. Beide haben die Entwicklung derselben Zahl von Wärmeeinheiten zur Folge, aber im ersten Falle wird der Draht sehr warm, da die Wärme zur Erhitzung eines kurzen dünnen Drahtes von geringer Masse verwandt wird, wogegen im zweiten Falle die Masse des langen dicken Drahtes vielleicht nur bis zu einem nicht merkbaren Grade erwärmt wird. Wiegt der Draht w Gramm und hat derselbe die spezifische Wärmekapazität s, so ist $H = s \cdot w \cdot \Theta$, wo Θ die Temperaturzunahme in (hundertteiligen) Graden bedeutet. Folglich:

$$\Theta = 0{,}24 \times \frac{C^2 R t}{sw}.$$

Da der Widerstand der Metalle bei steigender Temperatur zunimmt, so leistet ein dünner, durch den Strom erwärmter Draht grössern Widerstand, und erwärmt sich immer mehr, bis das Verhältnis des Wärmeverlustes durch Leitung und Ausstrahlung in die umgebende Luft dem Verhältnis der Wärmezufuhr durch den Strom gleichkommt.

Der folgende hübsche Versuch illustriert die Gesetze der Erwärmung. Der Strom einiger Elemente wird durch eine Kette geschickt, welche abwechselnd aus Gliedern von Silber- und Platindraht besteht. Die Platinglieder sind rotglühend, während die Silberglieder verhältnismässig kühl bleiben. Dies erklärt sich daraus, dass der spezifische Widerstand des Platins ungefähr 6mal grösser ist als der des Silbers, und seine Wärmekapazität ungefähr halb so gross; folglich ist die Temperaturzunahme in Drähten von gleicher Dicke, durch welche derselbe Strom fliesst, für Platin annähernd 12mal grösser als für Silber.

Digitized by Google

Dünne Drähte erwärmen sich viel schneller als dicke, da *die Temperaturzunahme in verschiedenen Teilen desselben Drahtes (welchen derselbe Strom durchfliesst) bei verschiedenen Dicken, der vierten Potenz des Durchmessers umgekehrt proportional ist.*

Nehmen wir z. B. an, dass ein Draht an einer beliebigen Stelle auf die Hälfte seines Durchmessers reduziert wird, so hat der Querschnitt eine Fläche, welche den vierten Teil von derjenigen im dickern Ende beträgt. Der Widerstand ist hier 4mal grösser, und die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten ist 4mal so gross wie in einer gleichen Länge des dickern Drahtes. Aber das 4fache der Wärmemenge, auf $\frac{1}{4}$ der Metallmasse verwendet, erwärmt dasselbe auf die 16fache Höhe, und $16 = 2^4$.

Für chirurgische Zwecke wird bisweilen ein dünner Platindraht, der von einem Strome bis zur Weissglühhitze erwärmt wird, statt eines Messers verwendet, wie z. B. bei der Operation der Amputation der Zunge beim Zungenkrebs. Platin wählt man wegen seiner schweren Schmelzbarkeit, doch selbst Platindrähte werden durch einen zu starken Strom geschmolzen. Von den Leitern widersteht die Kohle allein dem Schmelzen.

370. Sprengungen durch Elektrizität. In Folge dieser Wärmewirkungen lässt sich die Elektrizität dazu verwenden, um Minen in Brand zu stecken, indem starke leitende Drähte von einer geeigneten Batterie aus grösserer Entfernung nach einem besondern *Zünder* geführt werden, bei welchem ein sehr dünner Platindraht in den Stromleiter eingeschaltet ist. Dieser Draht erwärmt sich, wenn der Strom fliesst, und da er an einer leicht brennbaren Masse liegt und so als Zünder dient, so zündet er diese an und lässt die Pulverladung explodieren. Torpedos können auf diese Weise unter dem Wasser in beliebiger Entfernung von der Batterie gesprengt werden.

Der besondere Fall, wo Wärme durch einen Strom, welcher durch eine Verbindung ungleicher Metalle geht, zugeführt oder entzogen wird, der sogenannte Peltier'sche Wärmeeffekt, wird in Art. 380 erwähnt werden.

Digitized by Google

XXXII. VORLESUNG: *Das elektrische Licht.*

371. **Der Volta'sche Bogen.** Werden zwei Kohlenspitzen durch Drähte mit den Polenden einer kräftigen Volta'schen Batterie oder eines andern Erzeugers elektrischer Ströme verbunden, einen Moment lang zur Berührung gebracht und dann wieder bis auf einen kleinen Abstand von einander entfernt, so entsteht zwischen den Kohlenspitzen eine Art elektrische Flamme, der **Volta'sche Bogen** genannt, und ein glänzendes Licht strahlt von den Elektroden der heissen Kohlenspitzen aus. Diese Erscheinung wurde zuerst im Jahre 1800 von Humphrey Davy beobachtet und kann auf folgende Weise erklärt werden: Vor der Berührung reicht die Potentialdifferenz der Kohlenspitzen nicht aus, um einen Funken durch die Luft überspringen zu lassen, selbst wenn der Abstand nur $\frac{1}{400}$ Millimeter beträgt; werden jedoch die Kohlenspitzen zur Berührung gebracht, so entsteht ein Strom. Beim Trennen der Kohlenspitzen entsteht dann infolge von Selbstinduktion des Stromleiters (Art. 404) ein momentaner Extrastrom, der eine hohe elektromotorische Kraft besitzt und den kurzen Abstand überspringen kann; hierbei verflüchtigt sich ein geringer Teil der Kohle zwischen den Spitzen. Da Kohlendampf ein Halbleiter ist, so kann der Strom unausgesetzt die Lücke überspringen, falls dieselbe nicht zu gross ist; da aber der Kohlendampf einen sehr grossen Widerstand bietet, so wird derselbe durch den Durchgang des Stromes stark erwärmt, und die Kohlenspitzen werden ebenfalls heiss. Nun strahlen feste Körper das Licht besser aus als gasförmige, folglich geben die Kohlenspitzen weit mehr Licht von sich, als der Bogen selbst, obgleich jene nicht so heiss sind. Innerhalb des Bogens schmelzen die am schwersten schmelzbaren Körper, wie Kiesel und Diamant; und in seiner intensiven Hitze verflüchtigen sich ohne weiteres Metalle wie Gold und Platin. Wird der Bogen im

Digitized by Google

lufterfüllten Raume erzeugt, so brennen die Kohlenspitzen langsam weg auf dem Wege der Oxydation. Man hat auch beobachtet, dass Kohleteilchen von der + Elektrode abgelöst werden, welche dadurch becherartig ausgehöhlt wird, und einige dieser Kohleteilchen werden an der — Elektrode abgesetzt, welche dadurch die in Fig. 137 veranschaulichte Gestalt an-

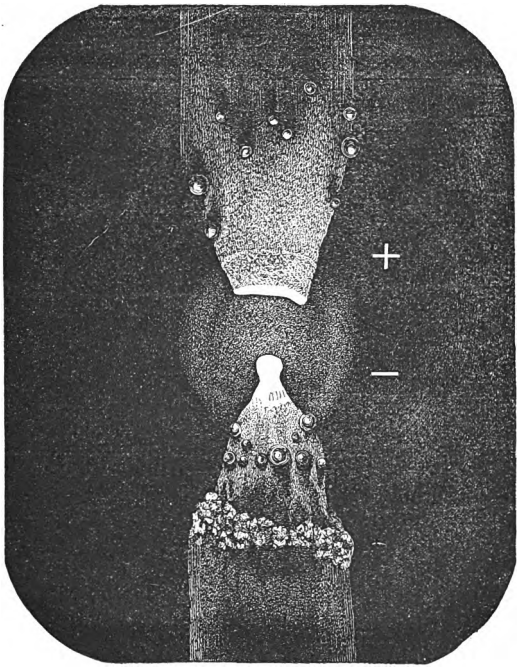

Fig. 137.

nimmt. Der Widerstand des Bogens variiert je nach Umständen zwischen 0,5 und 100 Ohm. Man hat auch gefunden, dass der Bogen eine besondere entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft besitzt und einen Gegenstrom zu erregen strebt.

Um ein befriedigendes elektrisches Licht zu erzeugen, ist mindestens eine elektromotorische Kraft von 40 bis 50 Volt erforderlich; und da der Strom wenigstens 5 bis 10 Ampère oder

Digitized by Google

noch mehr stark sein muss, so ist klar, dass der innere Widerstand der Batterie oder des Generators auf einer geringen Höhe erhalten werden muss. Mit schwächern Strömen oder geringeren elektromotorischen Kräften einen beständigen Bogen zu unterhalten, ist unzweckmässig. Der innere Widerstand der gewöhnlichen Daniell'schen oder Leclanché'schen Elemente (wie solche in der Telegraphie benutzt werden), ist zu gross, als dass sie zur Erzeugung des elektrischen Lichts benutzt werden könnten. Eine Batterie von 40 bis 60 Grove'schen Elementen (Art. 171) ist genügend, dauert jedoch nicht länger als 2 bis 3 Stunden. Eine dynamo-elektrische Maschine (wie eine solche in den Art. 407 bis 411 beschrieben werden wird), welche durch eine Dampfmaschine in Bewegung gesetzt wird, ist der beste Stromerzeuger für praktische elektrische Beleuchtung.

Die Lichtmenge, welche von einer elektrischen Lampe ausgestrahlt wird, ist der Stromstärke nicht einfach proportional; sie ist innerhalb gewisser Grenzen dem Quadrate der entwickelten Wärme oder der vierten Potenz der Stromstärke proportional.

372. Elektrische Bogenlichtlampen. Davy verwendete Holzkohle zu Elektroden, um das Bogenlicht zu erhalten. Später wurden von Foucault harte Gaskohlenstifte eingeführt. In allen neuern Bogenlichtlampen kommen Stifte einer dichtern und mehr homogenen, künstlichen Koakskohle zur Verwendung. Dieselben nutzen sich regelmässiger und langsamer ab; doch ist noch eine Vorrichtung nötig, um die Kohlenspitzen mit der erforderlichen Geschwindigkeit gegen einander zu bewegen. Der Bogen muss durch den Mechanismus erregt werden, indem er die Stifte zur Berührung bringt und dann sie wieder bis auf die gehörige Entfernung trennt, um einen beständigen Bogen zu erzeugen; durch den Mechanismus muss auch dafür gesorgt werden, dass die Kohlenspitzen in dem Bogen in eben dem Maasse wieder einander näher gerückt werden, wie sie verbraucht werden, und dass dieselben in automatischer Weise einander näher gerückt oder von einander entfernt werden, falls

Digitized by Google

der Bogen zu klein oder zu gross wird. Auch muss der Mechanismus die Kohlenspitzen einen Moment lang zur Berührung gelangen lassen, um den Bogen von neuem zu erregen, falls derselbe zufällig ausgegangen sein sollte. *Elektrische Bogenlichtlampen oder Regulatoren,* welche diese Bedingungen erfüllen, sind von verschiedenen Seiten konstruiert worden. Dieselben können folgendermaassen klassifiziert werden:

a) *Lampen mit Uhrwerk.* Fig. 138 zeigt den Regulator Foucault's, wie derselbe von Duboscq konstruiert wird; bei dieser Lampe werden die Träger der Kohlenstifte durch ein Uhrräderwerk bewegt, welches durch eine Feder getrieben wird. Am untern Teile zieht ein Elektromagnet, durch welchen der Strom fliesst, eine Armatur an und regelt das Uhrwerk. Ist der Strom zu stark, so wird die Armatur heruntergezogen und das Uhrwerk zieht die Kohlenstifte weiter auseinander. Wird der Strom durch den Widerstand des Bogens geschwächt, so wird die Armatur durch eine Feder aufwärts getrieben und ein zweites Räderwerk tritt in Wirkung und bewegt die Kohlenstifte näher aneinander. Lampen mit Uhrwerk sind auch von Serrin und Crompton konstruiert worden, bei denen der Mechanismus des Uhrwerks durch das Gewicht der Kohlenstifte getrieben wird.

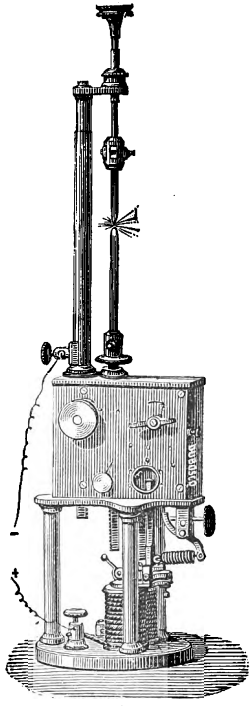

Fig. 138.

b) *Lampen mit Bremsrad.* Jaspar und Crompton haben einen Mechanismus erfunden, welcher die Art und Weise, in der die Kohlen einander genähert werden, regelt und bei dem zu dem Räderwerke noch ein Bremsrad hinzutritt; die Bremse, welche das Rad hemmt, wird durch einen kleinen Elektro-

Digitized by Google

magnet getrieben, welcher das Rad etwas weiter rollen lässt, wenn der Widerstand des Bogens über seinen normalen Betrag zunimmt.

c) *Solenoid-Lampen.* Bei dieser Art von Bogenlichtlampen ist das eine Kohlenstück an einem eisernen Stabe befestigt, der sich innerhalb einer hohlen Spirale (Solenoid) vertikal auf und ab bewegen kann. Da diese vom Strom durchflossen wird, so reguliert sie die Stellung der Kohlenspitzen und die Länge des Bogens. Siemens verwendete zwei Solenoide, welche differentiell gegen einander wirkten, indem das eine in den Hauptstrom, das andere in einen Nebenschluss des Stromes geschaltet war. Wurde der Widerstand des Bogens zu gross, so floss ein grösserer Teil des Stromes an der Lampe vorbei durch den Nebenschluss, so dass die Kohlenstücke dadurch einander näher gebracht wurden. Einen Nebenschluss zur Regulierung des Bogens wendeten auch Lontin, Brush, Lever und andere an.

d) *Lampen mit Klammern.* Eine etwas einfachere Vorrichtung ist der Gebrauch einer Klammer, welche das obere Kohlenstück in die Höhe zieht, während das untere fest bleibt. Bei dieser Art von Lampen wird die Klammer durch einen Elektromagnet in Bewegung versetzt, durch welchen der Strom hindurchgeht. Geht die Lampe aus, so lässt der Magnet die Klammer los und das obere Kohlenstück fällt durch sein eigenes Gewicht herab, und berührt das untere Kohlenstück. Sofort fliesst der Strom um den Elektromagnet, wodurch letzterer auf die Klammer wirkt, welche das Kohlenstück ergreift und dasselbe wieder bis zu dem erforderlichen Abstande in die Höhe hebt. Sollte der Bogen zu lang werden, so gestattet die verminderte Anziehung der Klammer dem Kohlenstück, etwas fortzurücken. Lampen mit Klammern wurden von Hart, Brush, Weston und Lever angewendet.

373. Elektrische Kerzen. Um die Kosten und den komplizierten Mechanismus solcher Regulatoren zu vermeiden, haben Jablochkoff, Wilde und andere elektrische *Kerzen* erfunden. Fig. 139 stellt die *Jablochkoff'sche Kerze* dar, welche

Digitized by Google

aus zwei parallelen harten Kohlenstiften besteht, die durch eine dünne Schicht von Wolfswurzpflaster getrennt sind und von einer vertikalen Stütze getragen werden. Der Bogen bildet sich oben an der Spitze zwischen den beiden Kohlendochten. Damit beide Kohlenstücke gleichmässig verbraucht werden, müssen schnell alternierende Ströme in Anwendung kommen, was vom ökonomischen Standpunkte aus nachteilig ist.

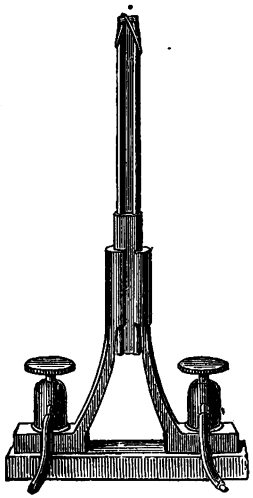

Fig. 139.

374. Elektrische Glühlampen. Volta'sche Bögen, deren Leuchtkraft weniger als 100 Kerzen beträgt, können praktisch nicht beständig unterhalten werden und sind auch unvorteilhaft. Für kleinere Beleuchtungen ist es einfacher und billiger, einen dünnen kontinuierlichen Draht oder einen Faden eines unschmelzbaren Leiters zu benutzen, welcher beim Stromdurchgang bis zur Weissglühhitze erwärmt wird. Dünne Platindrähte sind zu diesem Zwecke häufig in Vorschlag gekommen, doch ist bei ihnen Gefahr des Schmelzens vorhanden. Iridiumdrähte und dünne Kohlenstreifen sind ebenfalls von einigen Erfindern vorgeschlagen. Im Jahre 1878 erfand Edison eine Lampe, welche aus einer Platinspirale bestand, die mit einem Nebenschluss verbunden war, damit der Strom von der Lampe abgelenkt werden könnte, falls dieselbe überhitzt würde. In neuerer Zeit wendeten Swan, Edison, Lane-Fox, Maxim, Crookes und andere zur Konstruktion kleiner *Glühlichtlampen* Kohlefäden an. Bei diesen Lampen wird der Kohlefaden mit leitenden Drähten eingefasst (gewöhnlich Platin), welche in eine Glaskugel führen, wo sie festgesiegelt werden; dann werden aus den Glaskugeln die Luft und andere Gase möglichst vollkommen durch Gebrauch von besondern Quecksilberluftpumpen entfernt. Kohle eignet sich zu diesem Zwecke besser als Platin oder andere

Digitized by Google

Metalle, teils wegen ihrer schwierigeren Schmelzbarkeit und ihres grössern Widerstandes, teils wegen ihrer bemerkenswerten Eigenschaft, bei hohen Temperaturen einen geringern Widerstand zu bieten, als bei niedrigen Temperaturen. Diese Eigenschaft, welche gerade das Umgekehrte von der bei Metallen beobachteten ist, macht es weniger leicht möglich, dass die Lampe überhitzt wird. Die verschiedenen Formen der elektrischen Glühlichtlampen zeigt Fig. 140. Swan (1) verfertigt seinen Faden aus Baumwolle, welche zunächst in Schwefelsäure mit Pergament überzogen und dann verkohlt wird; ein solcher Faden wird durch diese Zubereitung äusserst elastisch und metallförmig. Edison (2) benutzt jetzt statt eines Fadens einen dünnen platten Streifen von verkohltem Bambus. Maxim (3) gebraucht eine Zubereitung aus Papier. Lane-Fox (4) und Akester (6) gebrauchen präparierte und verkohlte Pflanzenfaser. Crookes (5) benutzt einen aus animalischem oder vegetabilischem Stoffe bereiteten Faden, der durch eine Behandlung mit Kupfer-Ammoniakchlorür pergamentisiert ist. Der Widerstand solcher Lampen variiert je nach Grösse und Länge des Fadens zwischen 3 und 200 Ohm. Der Strom, welcher erforderlich ist, um die Fäden weissglühend zu machen, beträgt gewöhnlich 1 bis 1,3 Ampère. Um diesen Strom zu erzeugen, ist die anzuwendende elektromotorische Kraft von dem Widerstande der Lampe abhängig. Angenommen, wir hätten eine Lampe, deren Widerstand 60 oder 40 Ohm betrage, je nachdem dieselbe kalt oder heiss, so erhalten wir den erforderlichen Strom, wenn wir eine elektromotorische Kraft

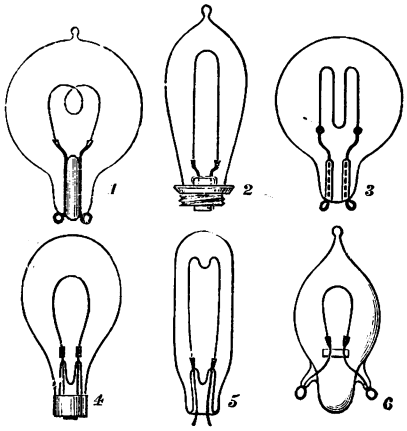

Fig. 140.

Digitized by Google

von circa 50 Volt anwenden, denn $50 : 40 = 1{,}25$ Ampère. Am billigsten stellt sich der Gebrauch sehr dünner, cylindrischer Fäden von hohem Widerstande. Platte Kohlenstreifen, welche eine verhältnismässig grosse Oberfläche bieten, und dicke Fäden von beträchtlicher Kohlenmasse sind nicht ohne Bedenken. Gut konstruierte Lampen halten, falls sie nicht überhitzt werden, 1000 bis 1200 Stunden vor, ehe der Faden sich auflöst. Gewöhnlich gruppiert man diese Lampen in parallelen Bögen zwischen dem den Strom zuführenden Hauptstrange und dem nach der Batterie zurückführenden Drahte, so dass jede Lampe von den übrigen unabhängig ist, wenn die elektromotorische Kraft der Zufuhr konstant ist. Das ausgestrahlte Licht variiert je nach der Grösse der Lampe zwischen 2 bis 50 Kerzen. Die Anfertigung solcher Fäden, welche bei ausreichender Dauerhaftigkeit beim Glühen eine höhere Lichtstärke liefern, scheint mit Schwierigkeiten verbunden zu sein.

XXXIII. VORLESUNG: *Elektromotoren. (Elektromagnetische Maschinen.)*

375. Elektromotoren. Elektromagnetische Maschinen oder Elektromotoren sind solche Maschinen, bei denen die bewegenden Kräfte von elektrischen, auf Elektromagnete wirkenden Strömen herrühren. Im Jahre 1821 zeigte Faraday einen einfachen Fall der Rotation, welche von einem Magnet und einem elektrischen Strome erzeugt wurde. Im Jahre 1831 konstruierte Henry, und 1833 Ritchie elektromagnetische Maschinen, welche auf elektromagnetischem Wege eine Rotation zu Stande brachten. Fig. 141 zeigt eine Modifikation des Elektromotors von Ritchie. Ein Elektromagnet DC balanziert auf einer vertikalen Achse zwischen den Polen eines festen Magnets

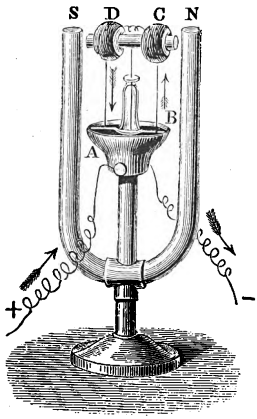

Fig. 141.

Digitized by Google

(oder Elektromagnets) SN. Ein durch eine geeignete Batterie erzeugter Strom wird durch Drähte in zwei Quecksilberschalen A und B geleitet, in welche die Enden der Spirale des beweglichen Elektromagnets CD tauchen. Geht ein Strom durch die Spirale von CD, so dreht sich der Elektromagnet derart, dass er sich in der Richtung der Verbindungslinie von N und S befindet. Bei dieser Drehung gehen jedoch die Drähte, welche in die Quecksilberschalen tauchen, von einer Schale zur gegenüberliegenden, so dass in dem Augenblicke, wo C sich S nähert, der Strom in CD umgekehrt wird und C von S abgestossen und von N angezogen wird, indem der durch CD gehende Strom bei jeder halben Umdrehung umgekehrt wird. Bei grössern Elektromotoren werden die Quecksilberschalen durch einen Kommutator ersetzt, welcher aus einem Messingringe besteht, der in zwei oder mehrere Teile geteilt ist und an zwei gegenüberliegenden Punkten durch ein Paar Metallfedern oder »Kontakt-Bürsten« berührt wird.

Bei einer andern, von Froment erfundenen Form des Elektromotors werden Eisenstäbe, die an dem Umfange eines rotierenden Cylinders befestigt sind, von einem Elektromagnet angezogen, bei welchem der Strom auf automatische Weise unterbrochen wird, wenn alle Stäbe ganz dicht bis zu seinen Polen angezogen sind. Bei einer dritten Art zieht ein Elektromagnet ein Stück weiches Eisen abwechselnd auf und ab, in ähnlicher Weise wie sich der Kolben einer Dampfmaschine bewegt, und diese Bewegung wird dann mittelst einer Kurbelstange in eine rotierende umgesetzt. Hier tritt dann die Schwierigkeit auf, dass die anziehende Kraft eine wirksame Bewegung nur auf sehr kleine Entfernungen erzeugen kann, da die Anziehung eines Elektromagnets dem Quadrate des Abstandes von seinen Polen umgekehrt proportional ist.

Die dynamo-elektrischen Maschinen von Gramme, Siemens und andern, welche in den Art. 407 bis 411 beschrieben werden, arbeiten auch als Elektromotoren, und haben in der That die grösste Wirksamkeit unter den elektromagnetischen Maschinen.

Digitized by Google

Im Jahre 1839 trieb Jacobi auf der Neva ein Boot mit einer Geschwindigkeit von 2¼ Meilen pro Stunde mittelst einer elektromagnetischen Maschine von circa einer Pferdekraft, welche durch eine Batterie von 64 grossen Grove'schen Elementen getrieben wurde.

Im Jahre 1882 wurde auf der Themse mit einer Geschwindigkeit von 8 Meilen pro Stunde ein eisernes Schraubenboot in Bewegung gesetzt, dessen Tragfähigkeit 12 Personen war und welches von zwei Siemens'schen Dynamomaschinen getrieben wurde, mit einer Stärke von circa 3 Pferdekräften; die Elektrizität wurde von 45 Sellon-Volckmar Akkumulatoren beschafft.

Elektrische Eisenbahnen, auf denen Züge von einer durch dynamo-elektrische Generatoren gelieferten Kraft getrieben werden (jene sind auf einer bestimmten Station aufgestellt und stehen mit der elektromagnetischen Maschinerie des Zuges entweder durch die Schienen oder durch einen besondern Konduktor in Verbindung) haben Siemens in Berlin und Edison in Menlo Park konstruiert.

376. Elektrische Kraftübertragung in die Ferne. Der zunehmende Gebrauch dynamo-elektrischer Maschinen zur elektrischen Beleuchtung hat von Neuem das Problem der Kraftübertragung in die Ferne auf elektrischem Wege in's Leben gerufen, um auf diese Weise die unbenutzte Wasserkraft zu verwerten. Ein Bergstrom kann dazu benutzt werden, ein Wasserrad oder eine Turbine zu drehen und eine dynamo-elektrische Maschine zu treiben, indem er hierdurch Ströme erzeugt, welche durch Drähte nach einem in der Ferne befindlichen Elektromotoren geleitet und dort in mechanische Arbeit umgesetzt werden. Ob solche Uebertragung vorteilhaft ist oder nicht, hängt von dem *Nutzeffekt* der verwendeten Maschinen ab.

377. Theorie des Nutzeffekts der Elektromotoren. Wird ein Galvanometer in einen Stromleiter mit einer Batterie und einem Elektromotoren eingeschaltet, so ergibt sich, dass der Strom *schwächer* ist, wenn der Elektromotor in Thätigkeit

Digitized by Google

ist, als wenn derselbe in Ruhe ist, und dass der Strom der Batterie um so schwächer wird, je stärker der Elektromotor arbeitet. Dies ist die Folge einer elektromagnetischen Induktion (Art. 391) zwischen den in Bewegung befindlichen und den ruhenden Teilen des Elektromotors, der bei seiner Umdrehung einen rückwärts gehenden Strom erzeugt. Die elektromotorische Kraft, welche von dieser Induktion herrührt, nimmt mit der Geschwindigkeit des Elektromotors zu, so dass der Gegenstrom am stärksten ist, wenn der Elektromotor die grösste Geschwindigkeit erreicht hat. Wird der Motor derart belastet, dass er bei langsamer Bewegung gegen bedeutende Kräfte Arbeit verrichtet, so ist der rückwärts gehende Strom schwach, und nur ein geringer Teil der Energie des Stromes wird in nutzbare Arbeit umgesetzt. Wird der Elektromotor so benützt, dass er sich sehr schnell dreht, und einen bedeutenden Gegenstrom erzeugt, so macht er einen grössern Teil der Energie des direkten Stromes nutzbar, erreicht jedoch die hierzu erforderliche Geschwindigkeit nur dann, wenn die zu verrichtende Arbeit sehr leicht ist. Jacobi rechnete aus, dass die praktische Leistungsfähigkeit zwischen diesen beiden Extremen läge, und dass ein Elektromotor in wirksamster Weise die Energie einer Batterie in Arbeit umsetzen würde, wenn derselbe seine Arbeit mit einer solchen Geschwindigkeit verrichten kann, dass der Strom der Batterie hierdurch auf die Hälfte seiner Stärke reduziert wird. Dem ist thatsächlich so, wenn es sich darum handelt, die Arbeit so schnell wie möglich zu verrichten. Wünscht man jedoch billig zu arbeiten, und kommt es weniger auf die Geschwindigkeit an, mit welcher die Arbeit verrichtet wird oder die Bestandteile der Batterie verbraucht werden, so erzielt man einen grössern ökonomischen Koeffizienten, wenn der Elektromotor eine leichte Arbeit verrichtet und dafür um so schneller arbeitet; denn beträgt die elektromotorische Kraft der Batterie E Volt, und die entgegengesetzte elektromotorische Kraft des in Bewegung befindlichen Motors e Volt, dann ist der Nutzeffekt des Motors (d. h. das Verhältnis der durch den

Digitized by Google

Strom geleisteten Arbeit zur gesamten Energie des Stromes) $= \frac{e}{E}$. Lässt man nun den Motor sich mit grösserer Geschwindigkeit bewegen, so nimmt e in demselben Verhältnis zu, und ist die Geschwindigkeit sehr gross, so kann der Fall eintreten, dass e beinahe $= E$ wird; d. h. der Motor macht alsdann fast die ganze Energie des Stromes nutzbar. Da aber nach dem Ohm'schen Gesetze der Strom $= \frac{E - e}{R}$ ist, so folgt, dass, wenn e beinahe so gross wie E geworden ist, der Strom auf einen geringen Bruchteil seiner ursprünglichen Stärke reduziert ist. Die Bestandteile der Batterie werden nicht so schnell abgenutzt, und es wird eine längere Zeit erforderlich sein, um den ganzen Betrag der Arbeit zu verrichten, doch wird der *Prozentsatz* der in Arbeit umgesetzten Energie des Stromes ein höherer sein. Eine Siemens'sche dynamo-elektrische Maschine (Art. 409), als Motor benutzt, kann einen Nutzeffekt von über 85 Prozent erreichen.

378. Arbeitsunkosten. Die Arbeitsunkosten sind bei den durch Batterieen getriebenen Elektromotoren nicht gering. Ein Pfund Zink enthält ungefähr nur den sechsten Teil an potentieller Energie, wie ein Pfund Kohle, und kostet mehr als das zwanzigfache: Die relativen Unkosten für gleiche Beträge an Energie verhalten sich daher wie 120 : 1. Wie wir jedoch oben gesehen haben, setzt eine elektromagnetische Maschine 85 Prozent der elektrischen Energie in Arbeit um, während die besten Dampfmaschinen ungefähr nur 10 bis 20 Prozent der Energie ihres Brennmaterials in Arbeit umsetzen, kleine Dampfmaschinen aber einen noch geringeren Nutzeffekt geben. Wenn wir also elektromagnetische Maschinen 5mal leistungsfähiger als Dampfmaschinen von gleicher Stärke rechnen, so ist die erforderliche Zinkmasse noch 24mal so teuer, als der gleiche Betrag an Kohle. Diese Berechnung lässt noch den Preis der Säuren der Batterie unberücksichtigt. Wo starke Ströme erforderlich sind, zieht man es in der That vor, die dynamo-elektrischen Maschinen

Digitized by Google

statt durch Batterieen, durch Dampf oder durch Wasser-Kraft oder durch Gasmaschinen zu treiben.

Im Falle der Kraftübertragung, wie im vorhergehenden Paragraphen, sind die Unkosten eventuell bedeutend kleiner, falls die ursprüngliche Wasserkraft wenig kostet. Die Dynamomaschine kann 90 Prozent der mechanischen Kraft in Energie elektrischer Ströme umsetzen, und der Elektromotor kann dann wieder 85 Prozent der Energie des Stromes (oder 76 Prozent der ursprünglichen Kraft) in Arbeit umsetzen.

378 a. Berechnung der elektrischen Kraft. *Die mechanische Arbeit* eines Stromes kann in folgender Weise berechnet werden: Ein Strom von der Stärke C sendet durch den Stromleiter in t Sekunden die Elektrizitäts-Menge Ct. Nun ist aber die Anzahl der Arbeitseinheiten W, welche von einem Strome verrichtet werden, gleich dem Produkte der Elektrizitätsmenge und der Potentialdifferenz E, durch welche dieselbe übertragen wird (Art. 367), vorausgesetzt, dass wir »absolute« C.G.S. Einheiten haben; oder:

$$CtE = W.$$

Wenn nun W Arbeitseinheiten in t Sekunden verrichtet werden, so erhalten wir die Arbeit pro Zeiteinheit durch Division von W durch t, folglich:

$$CE = \frac{W}{t}.$$

Sind C und E in Ampère resp. Volt ausgedrückt, und wollen wir die Arbeit pro Zeiteinheit in Pferdekräften ausdrücken, so müssen wir uns daran erinnern, dass 1 Ampère $= 10^{-1}$ C.G.S. Stromeinheiten; dass 1 Volt $= 10^{8}$ C.G.S. Einheiten der elektromotorischen Kraft, und dass eine Pferdekraft (nach der Definition von Watt) $=$ 550 Fusspfund pro Sekunde $=$ 76 Kilogrammometer pro Sekunde $=$ 76×10^{5} Gramm-Zentimeter pro Sekunde $=$ 746×10^{7} Erg pro Sekunde, folglich:

$$\frac{\text{C Ampère} \times \text{E Volt}}{746} = \text{Arbeit pro Zeiteinheit in Pferdekräften.}$$

Um z. B. die Geschwindigkeit zu berechnen, mit welcher in

Digitized by Google

einer elektrischen Lampe Arbeit verbraucht wird, messe man den ganzen Strom in Ampère und die Potentialdifferenz zwischen den Polen der Lampe in Volt; dann multipliziere man beides und dividiere das Produkt durch 746; das Resultat ist die Anzahl von Pferdekräften, welche in der Lampe verbraucht werden; oder man kann die Regel folgendermassen schreiben:

$$\text{Pferdekräfte} = C.E \times 0{,}00134.$$

Ein geeigneter »*elektrischer Kraftmesser*« lässt sich aus einem Elektrodynamometer (Art. 336) dadurch herstellen, dass man die feste Rolle aus dickem Drahte zur Aufnahme des ganzen Stromes einrichtet, und die aus zahlreichen Windungen bestehende Rolle von dünnem Drahte als Nebenschluss für die Lampe oder die Dynamomaschine einrichtet, deren Stärke gemessen werden soll.

Preece und Siemens haben den Vorschlag gemacht, der elektrischen Krafteinheit (d. h. einem Ampère, welches durch ein Volt wirkt) den Namen eines Watt zu geben. Eine Pferdekraft ist 746 Watt.

Digitized by Google

KAPITEL VIII.

THERMOELEKTRIZITÄT.

XXXIV. VORLESUNG: *Thermoelektrische Ströme.*

379. Im Jahre 1822 machte Seebeck die Entdeckung, dass in einem geschlossenen Stromleiter dadurch ein Strom erzeugt werden kann, dass man einen Berührungspunkt zweier ungleichen Metalle erwärmt. Werden z. B. ein Stück Wismut und ein Stück Antimon zusammengelötet und ihre freien Enden durch ein Galvanometer mit einer Rolle von kleinem Widerstande verbunden, und wird alsdann die zusammengelötete Stelle auf eine Temperatur gebracht, welche höher ist als die des übrigen Stromleiters, so fliesst ein Strom durch jene Stelle in der Richtung vom Wismut zum Antimon, wobei die Stromstärke der Temperaturdifferenz proportional ist. Wird die gelötete Stelle auf eine Temperatur abgekühlt, welche niedriger ist, als die des übrigen Stromleiters, so entsteht ein Strom in der entgegengesetzten Richtung. Die hier auftretende elektromotorische Kraft unterhält einen konstanten Strom, so lange die Temperaturdifferenz bestehen bleibt, indem während der ganzen Zeit Wärme absorbiert wird, um die Energie des Stromes zu unterhalten. Solche Ströme heissen **thermoelektrische Ströme**, und die sie erzeugende elektromotorische Kraft ist unter dem Namen *thermo-elektromotorischer Kraft* bekannt.

380. Der Peltier'sche Versuch. Im Jahre 1834 beobachtete Peltier eine Erscheinung, welche das Gegenteil der

Digitized by Google

Seebeck'schen Entdeckung ist. Wird von einer Batterie aus ein elektrischer Strom durch die Lötstelle ungleicher Metalle geschickt, so wird jene, wie er fand, entweder erwärmt oder abgekühlt, je nach der Richtung des Stromes. Ein Strom, welcher z. B. in der Richtung vom Wismut zum Antimon fliesst, absorbiert Wärme beim Durchgange durch die Lötstelle dieser Metalle und kühlt dieselbe ab; wogegen ein Strom, welcher durch die Lötstelle vom Antimon zum Wismut fliesst, Wärme entwickelt, so dass die Temperatur der Lötstelle zunimmt.

Diese Erscheinung der Erwärmung (oder Abkühlung) durch einen Strom, welcher durch 2 ungleiche, zusammengelötete Metalle fliesst (unter dem Namen des Peltier'schen Versuches bekannt, um dieselbe von der gewöhnlichen Erwärmung eines Stromleiters zu unterscheiden, welcher dem Strome einen Widerstand bietet; letztere Erscheinung bezeichnet man bisweilen als den Joule'schen Versuch), ist gänzlich verschieden von der Wärmeentwicklung in einem Leiter von hohem Widerstande, denn 1) ist der Peltier'sche Versuch *umkehrbar*, indem der Strom je nach seiner Richtung die Lötstelle entweder erwärmt oder abkühlt, wogegen ein Strom, welcher in einem dünnen Drahte auf Widerstand stösst, denselben stets erwärmt, in welcher Richtung der Strom auch fliesst; und 2) ist die beim Peltier'schen Versuche entwickelte oder absorbierte Wärmemenge einfach der Stromstärke proportional, und nicht dem *Quadrate* derselben, wie dies bei der durch Widerstand entwickelten Wärme der Fall ist.

Das vollständige Gesetz über die in einem Stromleiter entwickelte Wärme muss daher alle Peltier'schen Wirkungen berücksichtigen, die etwa an Metallverbindungen im Stromleiter auftreten. Bezeichnet man mit P die Potentialdifferenz, welche von dem Erwärmen der Lötstelle herrührt, und welche in Bruchteilen eines Volt ausgedrückt ist, so ist das vollständige Wärmegesetz:

$$H = 0{,}24 \times (C^2Rt + P \cdot Ct),$$

welches der Leser mit dem Joule'schen Gesetze in Art. 367 vergleichen möge. Die mit P bezeichnete Grösse ist auch als der *Koeffizient des Peltier'schen Versuches* bekannt, und hat für verschiedene Metallpaare auch

Digitized by Google

verschiedene Werthe; sie ist numerisch gleich der Anzahl von Arbeitseinheiten, welche das mechanische Aequivalent der Wärme sind, welche beim Durchgange eines elektrischen Ampère durch die Lötstelle zweier verschiedener Metalle entwickelt wird.

381. Thermoelektrische Gesetze. Die thermoelektrischen Eigenschaften eines Stromleiters können am besten an dem einfachen Stromleiter in Fig. 142 untersucht werden, welcher ein Wismut-Antimon-Paar darstellt, das durch einen Kupferdraht verbunden ist. Das Volta'sche Gesetz über die vom Kontakt herrührende Potentialdifferenz sagt uns, dass wenn überall dieselbe Temperatur vorhanden ist, die Potentialdifferenz zwischen Wismut und Kupfer in einer Richtung gleich ist der Summe der Differenzen zwischen Wismut und Antimon, und zwischen Antimon und Kupfer in der andern Richtung, und dass folglich zwischen den entgegengesetzt gleichen elektromotorischen Kräften Gleichgewicht bestehen würde. Wird jedoch eine Verbindungsstelle erwärmt, so existiert dies Gleichgewicht nicht mehr und das Volta'sche Gesetz verliert seine Giltigkeit. Die neue elektromotorische Kraft, welche an der erwärmten Verbindungsstelle in's Leben tritt, ist nun folgenden Gesetzen unterworfen:

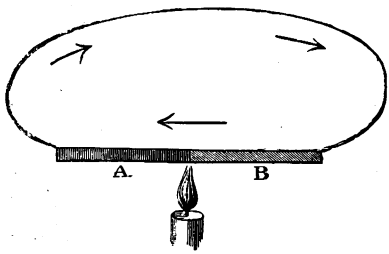

Fig. 142.

1) *Die thermoelektromotorische Kraft ist für dasselbe Metallpaar dem Temperaturüberschuss der Verbindungsstelle über die Temperatur des übrigen Stromleiters proportional* (selbst für bedeutende Temperaturdifferenzen).

2) *Die totale thermoelektromotorische Kraft eines Stromleiters ist die Summe aller einzelnen thermoelektromotorischen Kräfte an den verschiedenen Verbindungsstellen.*

Aus diesem Gesetze folgt, dass die verschiedenen Metalle sich, wie Seebeck fand, je nach ihrer thermoelektrischen Kraft in eine Reihe derart einordnen lassen, dass jedes vorhergehende Metall zu einem später folgenden (wie Wismut in Bezug auf

Digitized by Google

Antimon) thermoelektrisch positiv ist. Folgendes ist die **thermoelektrische Reihe** der Metalle, nebst den Potentialdifferenzen (in Mikrovolt), welche sie bei einem Temperaturunterschiede von einem Grad C. zeigen; Blei wird dabei als das normale Null-Metall betrachtet:

+	Wismut	89 bis 97
	Argentan . . .	11,75
	Blei	0
	Platin	— 0,9
	Zink	— 3,7
	Kupfer	— 3,8
	Eisen	— 17,5
—	Antimon	— 22,6 bis — 26,4

Ist das Metall nicht ganz rein, so macht dies einen bedeutenden Unterschied in der thermoelektrischen Kraft desselben aus, und einige Legierungen und Schwefelmetalle, wie z. B. Bleiglanz, zeigen bedeutende thermoelektrische Kraft.

Die elektromotorischen Kräfte, welche von der Erwärmung einzelner Metallpaare herrühren, sind in der That sehr klein. Wird die Verbindungsstelle eines Kupfer-Eisen-Paares um 1° C. mehr erwärmt, als der übrige Teil des Stromleiters, so beträgt die elektromotorische Kraft derselben nur 13,7 Mikrovolt. Diejenige des kräftigern Wismut-Antimon Paares beträgt für 1° C. ungefähr 117 Mikrovolt.

382. Thermoelektrische Inversion. Cumming machte die Entdeckung, dass für Eisen und andere Metalle bei hohen Temperaturen eine Inversion ihrer thermoelektrischen Eigenschaften stattfinden kann. Bei Kupfer und Eisen bildet die Temperatur von 280° einen neutralen Punkt; bei niedrigern Temperaturen fliesst der Strom durch die erwärmte Verbindungsstelle vom Kupfer zum Eisen; hat der Stromleiter aber eine höhere Temperatur als 280°, so verhält sich das Eisen in Bezug auf Kupfer thermoelektrisch positiv.

383. Thermoelektrisches Diagramm. Die Erscheinungen der Thermoelektrizität lassen sich am besten mit Hilfe

Digitized by Google

der Diagramme untersuchen, welche von W. Thomson angegeben und von Professor Tait konstruiert worden sind. In dem Diagramm der Fig. 143 stellen die horizontalen Linien Tem-

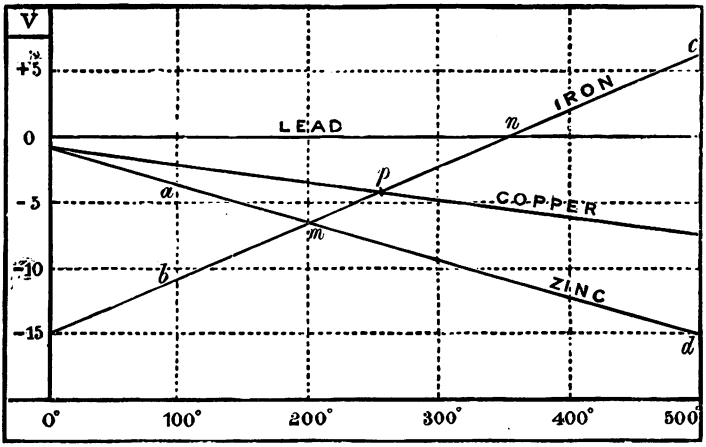

Fig. 143.

peraturen vor, und die vertikalen Abstände die Potentialdifferenzen in Milliontel eines Volt. Bei diesen Differenzen ist Blei zu Grunde gelegt und als Ausgangspunkt genommen, weil warmes Blei bei der Berührung mit kaltem Blei keine wahrnehmbare Potentialdifferenz zeigt, während im übrigen zwischen warmem und kaltem Metall derselben Art eine Potentialdifferenz zu existieren scheint.

Ein Beispiel mag den Nutzen des Diagramms erläutern. Angenommen, wir hätten einen Stromleiter hergestellt, indem wir ein Stück Eisen und ein Stück Kupfer an beiden Enden verbunden hätten; die eine Verbindungsstelle erhalten wir durch schmelzendes Eis auf 0°, die andere durch siedendes Wasser auf 100°. Dann wird die ganze elektromotorische Kraft des Stromleiters durch die Fläche *a*, 0, — 15, *b* dargestellt. Die Neigung der Linien für die verschiedenen Metalle repräsentiert die oben angeführte Eigenschaft einer elektromotorischen Kraft zwischen verschieden stark erwärmten Teilen desselben Metalls, begleitet von einer Absorption oder Entwicklung von Wärme, wenn der Strom von einer wärmern zu einer kältern Stelle desselben Metalls fliesst. Diese Eigenschaft, bekannt unter dem Namen des **Thomson-Effekt** (nach ihrem Entdecker W. Thomson) ist für Eisen das Gegenteil von

Digitized by Google

der für Kupfer oder Zink. Fliesst ein elektrischer Strom von einer warmen zu einer kalten Stelle des Kupfers, so entwickelt er Wärme in dem Kupfer; fliesst er aber von einer kalten nach einer warmen Stelle des Kupfers, so absorbiert er Wärme. Beim Eisen ist es umgekehrt.

384. Thermoelektrische Säulen. Um die elektromotorische Kraft des thermoelektrischen Paares zu erhöhen, vereinigt man gewöhnlich eine Anzahl von Metallpaaren (vorzugsweise Wismut und Antimon) zu einer Reihe, derart, dass die alternierenden Verbindungsstellen wie in Fig. 144 in BBB er-

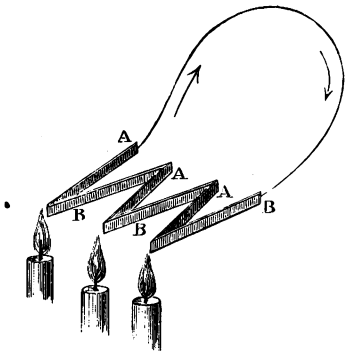

Fig. 144.

wärmt werden können, während die übrigen Verbindungsstellen bei A kalt bleiben. Die verschiedenen elektromotorischen Kräfte wirken dann alle in derselben Richtung, und der Strom nimmt in demselben Verhältnis zu, wie die Anzahl der geraden Verbindungsstellen. Kräftige thermoelektrische Batterieen hat Clamond angefertigt: eine Eisen-Bleiglanz-Batterie von 120 Paaren, welche einen starken Strom liefern; es ist jedoch äusserst schwierig, sie für längere Zeit in Wirksamkeit zu erhalten, da sie nach fortgesetztem Gebrauche versagen, wahrscheinlich in Folge einer permanenten molekularen Veränderung an den Verbindungsstellen. Die **thermoelektrische Säule** des Melloni, welche aus vielen kleinen Paaren von Wismut und Antimon aufgebaut ist, erwies sich als ein vorzügliches elektrisches Thermometer, wenn dieselbe mit einem empfindlichen astatischen Galvano-

Digitized by Google

meter mit Rolle von kleinem Widerstand (wie in Fig. 88) in Verbindung gebracht wurde. Um äusserst geringe Temperaturdifferenzen nachzuweisen, ist die thermoelektrische Säule von grossem Nutzen, da die Ströme der Temperaturdifferenz zwischen den wärmern Verbindungsstellen auf der einen Seite der Säule und den kalten Verbindungsstellen auf der andern Seite proportional sind. Fig. 145 zeigt die diesem Zweck entsprechende Aufstellung der Thermosäule und des Galvanometers.

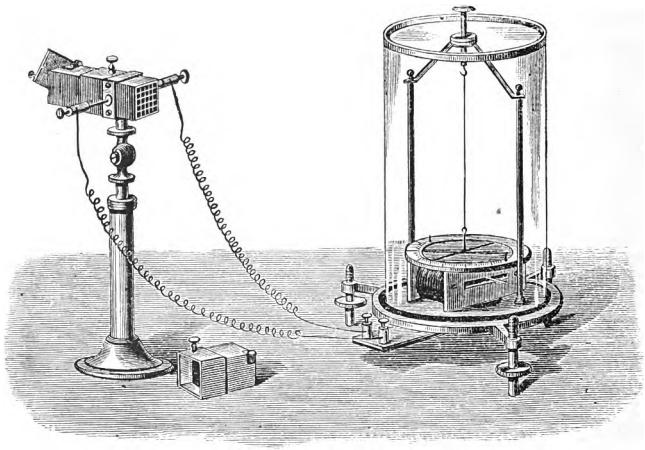

Fig. 145.

Digitized by Google

KAPITEL IX.

ELEKTRO-OPTIK.

XXXV. VORLESUNG: *Allgemeine Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität.*

385. In neuerer Zeit hat man verschiedene wichtige Relationen zwischen Licht und Elektrizität beobachtet. Diese Relationen lassen sich in folgender Weise klassifizieren:

1) Erzeugung von Doppelbrechung durch dielektrische Spannung.

2) Drehung der Polarisationsebene eines Lichtstrahls beim Durchgange durch ein durchsichtiges Medium, welches sich innerhalb eines magnetischen Feldes befindet, oder durch Reflexion an der Oberfläche eines Magnets.

3) Aenderung des elektrischen Widerstandes, beobachtet am Selen und andern Körpern, welche dem Lichte ausgesetzt wurden.

4) Relation zwischen dem Brechungsexponenten und der dielektrischen Kapazität durchsichtiger Körper.

Somerville, Zantedeschi und andere stellten die Behauptung auf, dass man Stahlnadeln dadurch magnetisieren könne, dass man Teile derselben der Einwirkung violetter und ultravioletter Lichtstrahlen aussetzt; die Beobachtungen beruhten jedoch auf Irrtum.

386. Elektrostatisch-optische Spannung. Im Jahre 1875 machte Dr. Kerr in Glasgow die Entdeckung, dass Glas,

Digitized by Google

welches einer starken elektrostatischen Spannung unterworfen wird, eine wirkliche Spannung erleidet, die mit Hilfe eines polarisierten Lichtstrahls beobachtet werden kann. Bei dem ersten Versuche wurden zwei Drähte in zwei Oeffnungen befestigt, welche in eine Glasplatte gebohrt waren, jedoch so, dass sie sich nicht ganz berührten; wurden sie dann mit den Enden einer Verstärkungsflasche einer Holtz'schen Maschine verbunden, so veranlassten die sich auf den Drähten ansammelnden Ladungen in dem dazwischen befindlichen dielektrischen Körper eine elektrostatische Spannung. Wurde die Platte zwischen 2 Nicol'sche Prismen, einen Polarisator und einen Analysator, gebracht, so zeigte sie Doppelbrechung. Das Glas verhielt sich ebenso, als wenn es einem Zuge in der Richtung der elektrischen Kraft unterworfen gewesen wäre, d. h. als wenn es sich längs der elektrostatischen Induktionslinien ausgedehnt hätte. Später fand er, dass Schwefelkohlenstoff und andere isolierende Flüssigkeiten ähnliche Erscheinungen aufweisen; dass jedoch fettige Oele tierischen und pflanzlichen Ursprungs eine Beeinflussung der entgegengesetzten Art zeigten, als wenn sie sich in der Richtung der Induktionslinien zusammengezogen hätten. Es ergibt sich, dass *die Grösse der optischen Wirkung* (d. h. die Differenz der Verzögerung zwischen dem ordentlichen und dem ausserordentlichen Lichtstrahle) pro Dickeneinheit des dielektrischen Körpers *dem Quadrate der resultierenden elektrischen Kraft proportional ist.* Die Achse der doppelten Brechung hat die Richtung der elektrischen Kraft. Quincke hat nachgewiesen, dass diese Erscheinungen sich mit Hilfe elektrostatischer Ausdehnungen und Zusammenziehungen, welche in Art. 273 behandelt worden sind, erklären lassen.

387. Magneto-optische Drehung der Polarisationsebene eines Lichtstrahls. Ein Lichtstrahl heisst *polarisiert,* wenn die Schwingungen in nur einer Ebene vor sich gehen. Gewöhnliches Licht kann in diesen Zustand übergeführt werden, wenn man es durch einen geeigneten Polarisationsapparat hindurchgehen lässt (wie z. B. durch ein Nicol'sches Prisma,

Digitized by Google

eine dünne Scheibe eines Turmalin etc.). Im Jahre 1845 machte Faraday die Entdeckung, dass ein in einer bestimmten Ebene polarisierter Lichtstrahl durch die Einwirkung eines Magnets gedreht werden kann, so dass die Schwingungen in einer andern Ebene stattfinden. Die Ebene, in welcher ein Lichtstrahl polarisiert ist, lässt sich dadurch bestimmen, dass man denselben durch ein zweites Nicol'sches Prisma (oder Turmalin) beobachtet, denn jeder Polarisator ist undurchsichtig für solche Strahlen, deren Polarisationsebene rechtwinklig zu seiner eigenen Polarisationsebene ist. Faraday liess einen polarisierten Strahl durch ein Stück »Flintglas« hindurchgehen (hauptsächlich aus borsaurem Blei bestehend), welches sich in einem kräftigen magnetischen Felde, zwischen den Polen eines grossen Elektromagnets befand, durch dessen Spiralen man nach Belieben einen Strom senden konnte. Der durchgegangene Strahl ging durch ein zweites Nicol'sches Prisma, welches so lange gedreht worden war, bis alles Licht ausgelöscht war. In dieser Lage war seine eigene Symmetrie-Ebene rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahles. Wurde der Stromleiter geschlossen, so bemerkte man sofort Licht durch das analysierende Nicol'sche Prisma, ein Beweis, dass der Lichtstrahl in eine neue Lage gedreht worden war, in welcher seine Polarisationsebene nicht mehr rechtwinklig zur Symmetrieebene des Analysators war. Wurde jedoch das analysierende Nicol'sche Prisma selbst gedreht, so konnte man eine neue Lage ausfindig machen (rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahles), in welcher das Licht von Neuem ausgelöscht wurde. *Die Richtung der magneto-optischen Drehung der Polarisationsebene stimmt* (für diamagnetische Media) *mit der Richtung des den Magnetismus erzeugenden Stromes überein.* Verdet, welcher Faraday's Versuche wiederholte, benutzte kräftige Elektromagnete von der in Fig. 127 abgebildeten Form und entdeckte damit das wichtige Gesetz, dass für eine gegebene Substanz *die Grösse der Drehung der Stärke der magnetischen Kraft H proportional ist.* Für den Fall, wo die Strahlen nicht in der Richtung der Kraftlinien gehen

Digitized by Google

(welches die Richtung der Maximal-Wirkung ist), ist die Grösse der Drehung *dem cosinus des Winkels β zwischen der Richtung des Strahls und den Kraftlinien proportional.* Auch ist die Drehung *der Länge l desjenigen Körpers proportional, durch welchen die Strahlen hindurchgehen.* Diese Gesetze lassen sich durch die Gleichung ausdrücken:

$$\Theta = w \,.\, H \,.\, \cos \beta \,.\, l,$$

wo Θ der Drehungswinkel und w eine Konstante ist, welche das spezifische magnetische Drehungsvermögen des gegebenen Körpers darstellt und unter der Bezeichnung »*Verdet's Konstante*« bekannt ist. Nun ist $H \,.\, \cos \beta$ der auf die Richtung des Strahles bezogene Teil der magnetischen Kraft; und $H \,.\, \cos \beta \,.\, l$ ist die Differenz des magnetischen Potentials [1]) zwischen dem Punkte A, wo der Strahl in das Medium eindringt, und dem Punkte B, wo er aus demselben austritt. Folglich ergibt sich das spezifische magnetische Drehungsvermögen w, indem man den beobachteten Drehungswinkel durch die Differenz des magnetischen Potentials zwischen den Punkten A und B dividiert, also

$$w = \frac{\Theta}{V_B - V_A}.$$

Das magnetische Drehungsvermögen ist für die verschiedenen Körper verschieden. Für diamagnetische Körper ist der Koeffizient gewöhnlich positiv, negativ jedoch für viele magnetische Körper, wie z. B. für Lösungen von Eisenchlor (d. h. bei diesen Körpern ist die Drehung der Richtung des magnetisierenden Stromes entgegengesetzt gerichtet). Die von Hall (Art. 337) entdeckte Erscheinung scheint mit derjenigen der magneto-optischen Rotation in engem Zusammenhange zu stehen.

1) Denn Kraft × Länge = Arbeit; und die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn ein magnetischer Einheitspol von A nach B der magnetischen Kraft entgegenbewegt wird, misst die Differenz des magnetischen Potentials. Vergl. Art. 310e.

Digitized by Google

	Verdet's Konstante in C.G.S.	Magnetisches Drehungsvermögen.
Schwefel-Kohlenstoff .	$1{,}5235 \times 10^{-5}$	1,000
Wasser	$0{,}4693 \times 10^{-5}$	0,308
Flintglas	$2{,}665 \times 10^{-5}$	1,422

Zum Zwecke des Vergleichs ist es bequem, das Drehungsvermögen des Schwefelkohlenstoffes als Einheit anzunehmen. Sorgfältige von J.E.H. Gordon angestellte Messungen haben ergeben, dass das als Norm angenommene Drehungsvermögen dieses Körpers mit $1{,}5235 \times 10^{-5}$ multipliziert werden muss, um dieselbe auf C.G.S. Maass zu reduzieren; denn er findet, dass dies die Anzahl der Grade ist, um welche ein polarisierter Strahl grünen Lichtes (einer Thalliumflamme) beim Durchgange durch die Einheit der Potentialdifferenz gedreht wird. Für Strahlen verschiedener Farben ist die Drehung nicht dieselbe, sondern (annähernd) dem Quadrate der Wellenlänge umgekehrt proportional; indem die durch Schwefelkohlenstoff erzeugte Drehung für rotes, grünes und blaues Licht (für die Strahlen C, E und G) die resp. Werte 0,60; 1,00 und 1,65 hat. H. Becquerel, welcher dieses Gesetz aufstellte, fand auch, dass die Drehung für Körper ähnlicher Natur von dem Brechungsexponenten abhängt, jedoch auf ziemlich komplizierte Weise, da sie dem Ausdrucke μ^2 ($\mu^2 - 1$) proportional ist, wo μ der Brechungsexponent ist.

Auch Gase erzeugen in einem magnetischen Felde eine Drehung der Polarisationsebene des Lichtes in verschieden hohem Grade; Kohlenoxyd und Kohlensäure sind kräftiger als Luft oder Wasserstoff; Sauerstoff und Ozon sind negativ. Die Drehung ist in allen Fällen sehr gering und ist stets der Dichtigkeit des Gases, d. h. der Menge des Gases proportional, welche der Lichtstrahl durchsetzt hat. H. Becquerel hat kürzlich gezeigt, dass die Ebene der natürlichen Polarisation des Himmels nicht mit der Ebene der Sonne zusammenfällt, sondern durch den Einfluss des Erdmagnetismus um einen Winkel

Digitized by Google

gedreht wird, welcher im Maximum auf dem magnetischen Meridian den Wert von 59 Bogenminuten erreicht.

388. **Photo-magnetische Eigenschaften des Eisens.** Im Jahre 1877 wies Dr. Kerr nach, dass ein polarisierter Lichtstrahl auch bei der *Reflexion an der Oberfläche eines Magnets oder Elektromagnets* gedreht wird. Findet die Reflexion an einem Pole statt, so dreht sich die Polarisationsebene nach der entgegengesetzten Richtung, nach welcher der magnetisierende Strom fliesst. Wird das Licht in einem seitlichen Punkte des Magnets reflektiert, so findet die Rotation in der Richtung des magnetisierenden Stromes statt, wenn die Polarisationsebene der Einfallsebene parallel ist; stehen jedoch beide Ebenen senkrecht auf einander, so findet die Rotation nur dann in jener Richtung statt, wenn der Einfallswinkel grösser als 75^0 ist.

Im Jahre 1884 führte Kundt den Nachweis, dass eine dünne, durchscheinende Eisenscheibe, welche von den Kraftlinien des magnetischen Feldes durchschnitten wurde, die Polarisationsebene des durchgegangenen Lichtes bedeutend nach der Seite drehte, nach welcher der magnetisierende Strom fliesst.

389. **Photo-galvanische Eigenschaften des Selen.** Im Jahre 1875 machte Willoughby Smith die Entdeckung, dass das Metall Selen die anormale Eigenschaft besitzt, seinen elektrischen Widerstand unter dem Einflusse des Lichts zu verändern. Das gewöhnliche flüssige oder glasartige Selen ist ein sehr schlechter Leiter; da sein Widerstand beinahe 40,000,000,000 ($3{,}8 \times 10^{10}$) mal so gross ist, als der des Kupfers. Wird dasselbe sorgfältig ausgeglüht (dadurch, dass es mehrere Stunden lang auf einer Temperatur von circa 220^0 C. erhalten, etwas unter seinem Schmelzpunkte, und dann langsam abgekühlt wird), so nimmt es eine krystallinische Gestalt an, in der sein elektrischer Widerstand bedeutend reduziert wird. Im letztern Zustande ist es besonders für Licht empfänglich. Professor W. G. Adams fand, dass grünlichgelbe Strahlen die wirksamsten waren. Er zeigte auch, *dass die Aenderung des elektrischen Widerstandes der Quadratwurzel aus der Lichtstärke direkt proportional ist,* und dass der Widerstand um so geringer ist, je grösser die elektromotorische Kraft ist. In neuerer Zeit haben Professor Graham Bell und Sumner »Selen-Zellen« konstruiert, bei denen das Selen in schmalen Streifen zwischen den Rändern von grossen

Digitized by Google

leitenden Kupferplatten sich befindet, wodurch sowohl eine Verkleinerung des Widerstandes erreicht, als auch eine grosse Oberfläche dem Lichte ausgesetzt wird. Eine Zelle z. B., deren Widerstand im dunkeln 300 Ohm betrug, hatte im Sonnenlichte nur einen Widerstand von 150 Ohm. Diese Eigenschaft des Selen hat man neuerdings zur Konstruktion des **Photophons** benutzt, eines Apparates, welcher mit Hilfe eines Lichtstrahles, der von einem dünnen, durch die menschliche Stimme in Schwingung versetzten Spiegel reflektiert wird, die Schallwellen in die Ferne überträgt; der Strahl trifft in Folge der Anordnung mit wechselnder Intensität auf eine Selenplatte, welche mit einer kleinen Batterie und einem Bell'schen Telephon (Art. 435) zu einem Stromkreise verbunden ist, in welchem die Töne durch die Schwankungen des Stromes reproduziert werden.

Aehnliche Eigenschaften finden sich in einem schwächern Grade beim Tellurium. Auch Kohle ist für das Licht empfindlich.

Um die Mitte dieses Jahrhunderts führte Becquerel den Nachweis, dass, wenn man zwei Silberplatten, welche mit einem frischen Niederschlag von Silberchlorür überzogen sind, in einen Becher mit Wasser stellt und mit einem Galvanometer verbindet, ein Strom hindurchgeht, wenn auf die eine der beiden Platten Licht auffällt, indem dieselbe dann als negativer Pol wirkt.

390. Elektromagnetische Theorie des Lichtes. Clerk Maxwell brachte über den Zusammenhang zwischen den elektromagnetischen Erscheinungen und denen des Lichtes eine Theorie in Vorschlag, welche auf der Annahme basiert, dass beide Arten von Erscheinungen gewisse Bewegungszustände des den ganzen Weltenraum durchdringenden »Aethers« sind, und zwar die elektrischen und magnetischen Erscheinungen Folge von Strömungen und Wirbeln oder andern körperlichen Bewegungen des Aethers, das Licht dagegen Folge von hin und hergehenden Schwingungen desselben.

Wir haben gesehen (Art. 115, 338 und 387), welcher Grund zu der Annahme vorliegt, dass der Magnetismus eine Rotationserscheinung sei, bei

Digitized by Google

der ein bestimmtes Etwas um eine Achse rotiert, welche die Richtung des Magnetismus angibt. Eine solche Theorie würde die Rotation der Polarisationsebene eines Lichtstrahles erklären, welcher durch ein magnetisches Feld hindurchgeht. Denn wir können uns vorstellen, dass ein in einer Ebene polarisierter Lichtstrahl aus einem (entgegengesetzt) kreisförmig polarisiertem Wellenpaar besteht, bei welchem die nach rechts gerichtete Rotation in dem einen Strahle durch eine ebenso grosse, nach links gerichtete Rotation in dem andern Strahle periodenweise aufgehoben wird; und wenn eine solche Bewegung einem Medium mitgeteilt wird, in dem eine Superposition einer Rotation in derselben Richtung stattfindet (wie wir von jedem magnetischen Felde annehmen), so würde einer dieser kreisförmig polarisierten Strahlen eine Beschleunigung und der andere eine Verzögerung erleiden, so dass, wenn sie von Neuem zu einem einzigen plan-polarisierten Strahle zusammengesetzt würden, die Polarisationsebene nicht mit der ursprünglichen zusammenfallen würde, sondern offenbar um einen Winkel gedreht worden wäre, welcher der hinzugetretenen Rotation proportional wäre.

Es wurde nachgewiesen (Art. 337), dass eine elektrische Verschiebung eine magnetische Kraft erzeugt, welche rechtwinklig zu derselben ist; sie erzeugt auch (durch die besondere, als Induktion bekannte Erscheinung) eine elektrische Kraft, welche sich rechtwinklig sowohl zur elektrischen Verschiebung, als auch zur magnetischen Kraft fortpflanzt. Nun wissen wir, dass bei der Fortpflanzung des Lichtes die wirklichen Verschiebungen oder Vibrationen, welche den sogenannten Lichtstrahl ausmachen, in Richtungen vor sich gehen, welche rechtwinklig zur Fortpflanzung sind. Diese Analogie ist in der Theorie ein wichtiger Punkt, und legt unmittelbar die Frage nahe, ob die bezüglichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten dieselben sind. Nun ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Induktion diejenige Geschwindigkeit v, welche, wie in Art. 365 gezeigt wurde, das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten darstellt und welche (in der Luft) zu

$$2{,}9857 \times 10^{10} \text{ Zentimeter pro Sekunde}$$

angenommen wird. Und die Geschwindigkeit des Lichtes (in der Luft) ist wiederholt gemessen worden (von Fizeau, Cornu, Michelson und andern) und hat den Näherungswert

Digitized by Google

$2{,}9992 \times 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde.

Die grosse Uebereinstimmung dieser Zahlen ist wenigstens bemerkenswert. Unter andern mathematischen Deduktionen, die sich aus dieser Theorie ergeben, sollen noch folgende erwähnt werden:

1) Alle wirklichen Leiter der Elektrizität müssen für das Licht undurchsichtig [1]) sein. 2) Für durchscheinende Media müsste die spezifische induktive Kapazität dem Quadrate des Brechungsexponenten gleich sein. Gordon, Boltzmann und andere haben Versuche angestellt, welche die angenäherte Richtigkeit dieser Behauptungen für Wellen von bedeutender Länge erweisen. Die Werte finden sich weiter unten. Für Gase ist die Uebereinstimmung eine noch grössere.

	K	μ^2
Flint-Glas	3,162	2,796
Schwefelkohlenstoff	1,812	2,606
Schwefel (gewöhnlicher)	4,151	4,024
Paraffin	2,32	2,33

1) Der Verfasser dieser Vorlesungen hat gefunden, dass bei einigen Krystallen, welche die Elektrizität in einer Richtung besser leiten, als in der andern, die Undurchsichtigkeit für Licht dem entsprechend verschieden ist. Farbige Turmalinkrystalle leiten die Elektrizität besser rechtwinklig zur Längsachse des Krystalls, als in seiner Achse selbst. Solche Krystalle sind bei weitem undurchsichtiger für solches Licht, welches längs der Achse durch den Krystall geht, als für solches, welches rechtwinklig zur Achse hindurchgeht. Und in dem Falle, wo die Strahlen rechtwinklig zur Achse durch den Krystall hindurchgehen, werden die Schwingungen senkrecht zur Achse vollständiger absorbiert, als diejenigen, welche parallel zur Achse sind; daraus folgt, dass das durchgehende Licht polarisiert wird.

Digitized by Google

KAPITEL X.

INDUKTIONSSTRÖME (Magnet-Elektrizität).

XXXVI. VORLESUNG: *Von den durch Induktion erzeugten Strömen.*

391. Im Jahre 1831 machte Faraday die Entdeckung, dass in einem geschlossenen Stromleiter sich dadurch Ströme erregen lassen, dass man in seiner Nähe Magnete bewegt oder dass man den Stromleiter durch ein magnetisches Feld führt; und er vervollständigte diese Entdeckung noch, indem er feststellte, dass ein Strom von veränderlicher Stärke in einem geschlossenen in seiner Nähe befindlichen Stromleiter einen sekundären Strom induzieren kann. Solche Ströme, die durch Magnete oder andere Ströme erzeugt werden, heissen **Induktionsströme.** Und die Entstehung dieser induzierten Ströme durch einen Magnet oder einen Strom wird **elektromagnetische Induktion** [1]) genannt.

---

1) Der Leser darf diese elektromagnetische Induktion nicht mit der Erscheinung der elektrostatischen Induktion einer elektrischen Ladung durch eine andere Ladung (siehe Vorlesung IV) verwechseln; letztere hat mit elektrischen Strömen nichts zu thun. In frühern Zeiten, als man von der Iden-

Digitized by Google

392. Von den durch einen Magnet erzeugten Induktionsströmen. Wird eine Rolle aus isoliertem Drahte zu einem Stromkreise mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden, und wird ein Magnet schnell in die Oeffnung der Rolle geschoben (wie in Fig. 146), so beobachtet man einen vorübergehenden Strom, welcher den Stromkreis durchfliesst, während der Magnet in die Rolle geschoben wird. So lange der Magnet ruhig in der Rolle steckt, induziert derselbe keine Ströme. Wird derselbe jedoch rasch aus der Rolle herausgezogen, so beobachtet man einen zweiten vorübergehenden Strom, welcher in einer dem ersten Strome entgegengesetzten Richtung fliesst. Der induzierte Strom, welcher durch das Hineinstecken des Magnets erzeugt wurde, ist ein *entgegengesetzt* gerichteter Strom, d. h. er fliesst in entgegengesetzter Richtung von demjenigen Strome, der den Magnet mit seiner vorhandenen Polarität erzeugen könnte. Der induzierte Strom, der durch das Herausnehmen des Magnets veranlasst wurde, ist ein *gleich gerichteter* Strom.

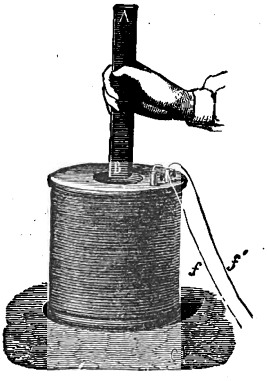

Fig. 146.

Ob die Rolle nach dem Magnet hin bewegt wird, oder ob der Magnet nach der Rolle hin bewegt wird, ist für den Erfolg

---

tität der von verschiedenen Quellen herrührenden Elektrizitäten (Art. 218) noch nichts wusste, wurde diejenige Elektrizität, welche der Bewegung von Magneten entsprang, Magneto-Elektrizität genannt. Für die meisten Zwecke sind die Ausdrücke magneto-elektrisch und elektromagnetisch gleichbedeutend. Die Erzeugung der Elektrizität durch Magnetismus und des Magnetismus durch Elektrizität sind in der That zwei verschiedene Operationen; doch sind beide in demjenigen Zweige der Wissenschaft enthalten, welcher Elektromagnetismus genannt wird.

Digitized by Google

vollständig dasselbe. Je schneller die Bewegung vor sich geht, um so stärker sind die induzierten Ströme.

393. Von den Induktionsströmen, welche durch Ströme erzeugt werden. Faraday führte auch den Nachweis, dass die Annäherung oder Entfernung eines Stromes in einem benachbarten geschlossenen Stromleiter einen Strom induzieren kann. Der hierher gehörige Versuch lässt sich zweckmässig mit dem Apparate der Fig. 147 anstellen.

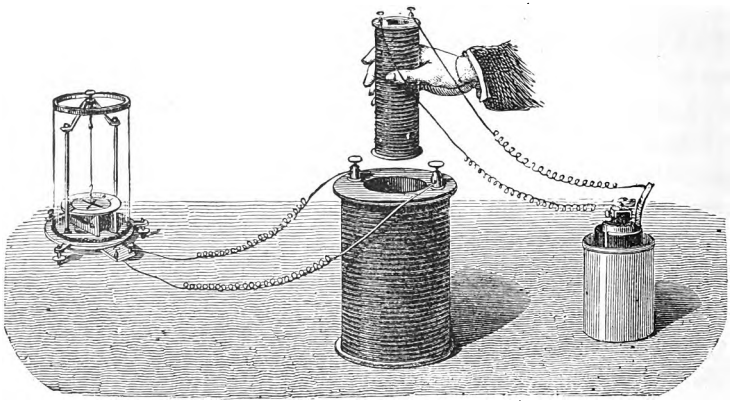

Fig. 147.

Eine Rolle wird in der vorigen Weise mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden. Eine kleinere Rolle aus dichtem Draht wird mit den Polen einer Batterie verbunden (in Fig. 147 aus einem einfachen Bunsen'schen Element bestehend), so dass ein Strom durch dieselbe hindurchfliesst. Nähert man die kleinere oder »*primäre*« Rolle der grössern oder »*sekundären*« Rolle, oder schiebt erstere in diese hinein, so entsteht ein vorübergehender, entgegengesetzt gerichteter Strom; und beim Entfernen der primären Rolle beobachtet man einen vorübergehenden, gleich gerichteten Strom (d. h. einen solchen, welcher

Digitized by Google

in derselben Richtung durch die äussere sekundäre Rolle fliesst, wie der primäre Strom, welcher in der innern Rolle zirkuliert). Unterbricht man den Batterie-Strom, während die primäre Rolle ruhig innerhalb der sekundären äussern Rolle sich befindet, so hat dies dieselbe Wirkung, als wenn die primäre Spirale plötzlich in unendliche Entfernung gebracht würde. Das Schliessen des Batterie-Stromes hat, so lange die primäre Rolle sich innerhalb der sekundären befindet, dieselbe Wirkung, wie das plötzliche Eintauchen der einen in die andere.

So lange ein konstanter Strom durch den primären Stromleiter geht, werden in dem sekundären Stromleiter keine Ströme induziert, vorausgesetzt, dass beide Stromleiter nicht in *relativer Bewegung* zu einander sind; ein Bewegen des sekundären Stromleiters gegen den primären hat jedoch dieselbe Wirkung, wie ein Bewegen des primären Stromleiters gegen den sekundären, und umgekehrt.

Wir können diese Resultate in folgender Tabelle veranschaulichen:

Durch einen	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende entgegengesetzt gerichtete Ströme induziert	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende gleichgerichtete Ströme induziert
Magnet	Bei der Annäherung	Bei der Entfernung
Strom	Bei der Annäherung oder beim Beginn oder bei wachsender Stromstärke.	Bei der Entfernung oder beim Aufhören oder bei abnehmender Stromstärke.

394. Fundamentale Gesetze über Induktion. Wenn wir berücksichtigen, dass jeder von einem Strome durchflossene Stromleiter ein besonderes magnetisches Kraftfeld hat, dessen Kraftlinien durch den Stromkreis führen (Art. 192), und dass

Digitized by Google

eine Rolle mit zahlreichen Windungen ein Feld hat, in welchem die Kraftlinien fast genau so verteilt sind, wie diejenigen eines Magnets, so erkennen wir, dass die im vorhergehenden Paragraphen angegebenen Thatsachen in folgende Fundamentalgesetze zusammengefasst werden können:

1) Eine Abnahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch einen Stromkreis führen, erzeugt in demselben einen Strom in der positiven Richtung (d. h. einen »gleich gerichteten« Strom); während eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis gehen, in demselben einen Strom in der negativen Richtung erzeugt.

Hier nehmen wir an, dass die positive Richtung längs der Kraftlinien diejenige Richtung ist, nach welcher ein freier N.-Pol sich bewegen würde, und dass die positive Richtung im Stromleiter dieselbe Richtung ist, nach welcher sich die Zeiger einer Uhr drehen. (Vergl. auch Art. 318.)

2) Die gesamte induzierte elektromotorische Kraft, welche in einem geschlossenen Stromleiter thätig ist, ist der Abnahme der Anzahl von Kraftlinien proportional, welche durch den Stromkreis gehen.

Nehmen wir zunächst an, N_1 sei die Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis hindurchgehen und nach einem sehr kurzen Zeitabschnitt t sei die Zahl gleich N_2 geworden, dann ist die gesamte induzierte elektromotorische Kraft

$$E = \frac{N_1 - N_2}{t}.$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $C = \frac{E}{R}$, folglich

$$C = \frac{N_1 - N_2}{R \cdot t}.$$

Ist $N_2 > N_1$, so findet eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien statt und $N_1 - N_2$ ist dann eine negative Grösse, so dass C mit negativem Vorzeichen auftritt, ein Beweis, dass der Strom ein entgegengesetzt gerichteter ist.

Dies wichtige Gesetz können wir uns noch klarer machen, indem wir auf Fig. 134 zurückgehen Nehmen wir an, ABCD sei ein Stromleiter, von welchem das Stück AB längs DA und CB nach S und T gleiten kann. Die vertikalen Pfeile mögen vertikale Kraftlinien in einem gleichmässigen

Digitized by Google

magnetischen Felde darstellen und (wie bei den vertikalen Komponenten der Kraftlinien der Erde auf der nördlichen Halbkugel) die Richtung angeben, nach welcher sich ein N-Pol, falls derselbe frei wäre, bewegen würde. Die positive Richtung dieser Kraftlinien geht daher vertikal nach unten durch den Stromleiter. Wenn nun AB nach ST mit gleichförmiger Geschwindigkeit gleitet, so schneidet AB in jeder Sekunde eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien, und in jeder Sekunde kommt eine gewisse Anzahl zu der totalen Summe der Kraftlinien hinzu, welche durch den Stromleiter gehen. Ist N_1 die Anzahl im Anfange, und N_2 diejenige am Ende eines Stromleiters, so ist $N_1 - N_2$ eine negative Grösse und in dem Stromkreise ist eine elektromotorische Kraft vorhanden, deren Richtung durch das gleitende Stück von A nach B geht.

395. Die Ampère'sche Regel lässt sich in folgender Weise mit Nutzen auf den Fall der Induktion anwenden: *Angenommen, dass in einem Leiter eine menschliche Figur schwimmt, welche nach der + Richtung der Kraftlinien blickt; wird dieselbe und mit ihr der Leiter nach rechts bewegt, so wird durch diese Bewegung ein Strom induziert, welcher nach derselben Seite fliesst, nach welcher die Figur schwimmt;* wird die Figur nach links bewegt, so schwimmt sie gegen den Strom.

396. **Gesetz von Lenz.** In Art. 320 wurde festgestellt, dass auf einen Stromkreis, durch welchen ein Strom fliesst, eine Kraft wirkt, welche denselben derart zu bewegen strebt, dass der Stromkreis ein Maximum von Kraftlinien einschliesst. Nimmt jedoch die Anzahl der Kraftlinien zu, so tritt während der Zunahme eine entgegengesetzt gerichtete (oder negative) elektromotorische Kraft auf, welche den ursprünglichen Strom und damit auch die Bewegung zu hemmen strebt. Ist im Anfange kein Strom vorhanden, so erzeugt die Bewegung einen solchen, welcher, da er in negativer Richtung fliesst, die Zahl der durch den Stromleiter führenden Kraftlinien zu vermindern und auf diese Weise die Bewegung zu hemmen sucht. Lenz fasste im Jahre 1834 alles dahin zusammen, dass er sagte: *In allen Fällen einer elektromagnetischen Induktion haben die induzierten Ströme eine solche Richtung, dass ihre Gegenwirkung die sie erzeugende Bewegung zu hemmen strebt.* Dies ist bekannt unter dem Namen des Gesetzes von Lenz.

397. **Gegenseitige Induktion zweier Ströme.** In Art 320 wurde bewiesen, dass zwei Stromleiter, durch welche Ströme von der Stärke eins fliessen, und welche neben einander gestellt werden, ein gegenseitiges Potential haben, dessen Wert wir mit M bezeichneten. Dieses Symbol M repräsentierte, wie sich im Lauf der Untersuchung herausstellte, die Anzahl derjenigen Kraftlinien, welche ein Stromleiter in dem andern in-

Digitized by Google

duziert, oder war »die Anzahl der gegenseitigen Kraftlinien, welche jeder Stromleiter vom andern durchschneidet, wenn in jedem ein Einheitsstrom zirkuliert«. Diese Anzahl hing von der Gestalt und Lage der Stromleiter ab, und war ein Maximum, wenn dieselben möglichst nahe neben einander waren. Folglich können wir diese Grösse M als den »Koeffizienten der gegenseitigen Induktion« der beiden Stromleiter ansehen; und jede Bewegung eines der Stromleiter, welche die Anzahl der durch sie hindurchführenden Kraftlinien ändert, induziert gleichzeitig Ströme in jedem derselben. Es lässt sich mathematisch nachweisen, dass für den Fall zweier einfacher kreisförmiger Stromleiter von gleicher Grösse, welche die Fläche S einschliessen, die grösste Anzahl von Kraftlinien, welche jeder in dem andern induzieren kann, die Stromstärke eins vorausgesetzt, $= 4\pi S$ ist. Sind die Stromleiter nicht einfach, und haben dieselben m, resp. n Windungen, so hat M den Wert $4\pi S \times mn$, wenn die Stromleiter mit einander zusammenfallen.

398. Die Induktionsrolle. Induzierte Ströme haben im allgemeinen enorm hohe elektromotorische Kräfte und liefern einen Funken von bedeutender Länge, wie ihn gewöhnliche Batterie-Ströme nicht zu liefern im Stande sind. Um dies zu beobachten, benutzen wir einen von Mason erfundenen und von Ruhmkorff verbesserten Apparat: **den Induktionsapparat** oder das Induktorium. (Fig. 148.) Der Induktionsapparat besteht aus einer zylinderförmigen Spule, welche einen zentralen Eisenkern umschliesst. Diesen Eisenkern umgeben eine kurze, innere oder »primäre« Rolle aus dickem Drahte und eine äussere »sekundäre« Rolle, welche aus mehreren tausend Windungen eines sehr feinen, in seinen einzelnen Teilen sehr sorgfältig isolierten Drahtes besteht. Der primäre Stromleiter wird mit den Polenden einer aus mehreren kräftigen Grove'schen oder Bunsen'schen Elementen bestehenden Batterie verbunden, und ausserdem werden noch ein Unterbrecher und ein Kommutator oder Schlüssel eingeschaltet. Der Unterbrecher hat den Zweck, den Strom der primären Rolle in rascher Aufeinanderfolge zu

Digitized by Google

unterbrechen und wieder zu schliessen. Dies hat zur Folge, dass jedesmal wenn der Stromleiter geschlossen wird, in der

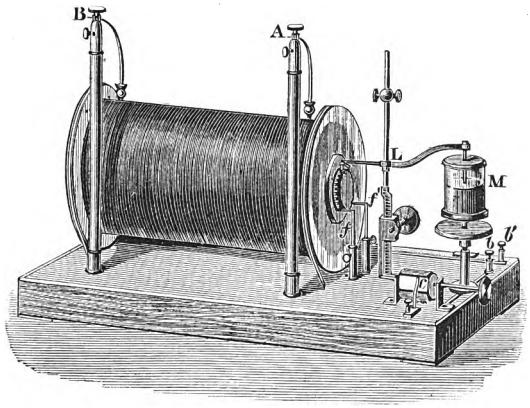

Fig. 148.

äussern »sekundären« Spirale ein momentaner entgegengesetzt gerichteter Strom induziert wird, und jedesmal, wenn der Strom unterbrochen wird, ein kräftiger momentaner gleich gerichteter Strom. Die beim »Schliessen« induzierten Ströme werden in einer Art und Weise, die weiter unten erklärt werden wird, unterdrückt: die beim »Unterbrechen« induzierten Ströme treten als glänzender Funkenstrom zwischen den einander genäherten Enden der sekundären Rolle auf. Die primäre Rolle wird aus starkem Drahte verfertigt, um starke Ströme leiten und ein kräftiges magnetisches Feld im Zentrum erzeugen zu können, und besteht aus wenigen Windungen, damit der Widerstand nicht zu gross wird und damit eine Selbst-Induktion des primären Stromes auf sich selbst vermieden wird. Der zentrale Eisenkern hat den Zweck, durch seinen grossen magnetischen Induktionskoeffizienten die Anzahl der Kraftlinien zu vermehren, welche durch die Rollen gehen; er besteht gewöhnlich aus einem Bündel dünner, von einander isolierter Drähte, um die Induktionsströme zu vermeiden, welche in demselben zirkulieren würden, wenn derselbe ein solider Stab wäre, und welche

Digitized by Google

die Schnelligkeit seiner Magnetisierung oder Entmagnetisierung verlangsamen würden. Die sekundäre Rolle besteht aus vielen Windungen, um den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zu vergrössern; und da die elektromotorische Kraft der induzierten Ströme Tausende von Volt beträgt, so ist ihr Widerstand von keiner Bedeutung, und man kann dieselbe aus dem dünnsten Drahte verfertigen, der sich noch bequem winden lässt. Bei Spottiswoode's Riesen-Induktionsapparate (welcher einen Funken von über 1 Meter Länge in der Luft liefert, wenn 30 Grove'sche Elemente wirken), enthält die sekundäre Spirale einen 280 Meilen langen Draht von 340,000 Windungen, und bietet einen Widerstand von mehr als 100,000 Ohm.

Die Unterbrecher der Induktionsspiralen sind gewöhnlich sogenannte selbstthätige. Der Foucault'sche Unterbrecher, welcher in Fig. 148 mitabgebildet ist, besteht aus einem Messingarme L, welcher einen in eine Quecksilberschale M tauchenden Platindraht trägt. Jedesmal wenn der Eisenkern der Rolle magnetisiert wird, zieht derselbe ein Stück Eisen am Ende des Armes L an, und dadurch wird der Platindraht aus dem Quecksilber gezogen und der Strom dann unterbrochen. Durch eine Feder wird der Arm wieder in die ursprüngliche Lage zurückgezogen, nachdem der Eisenkern beim Oeffnen des Stromleiters seinen Magnetismus wieder verloren hat. Bei kleinen Rollen besteht der Unterbrecher gewöhnlich aus einem dünnen Stahlstabe, welcher eine Platinspitze berührt und der beim Durchgange des Stromes durch die Anziehung des Eisenkernes zurückgezogen wird. Auf diese Weise schliesst und unterbricht er den Stromleiter, indem er wie der Hammer einer gewöhnlichen elektrischen Glocke hin und her schwingt.

Mit der primären Rolle ist gewöhnlich ein kleiner *Kondensator* verbunden, welcher aus Zinnfolie und paraffiniertem Papier besteht, die abwechselnd über einander geschichtet sind. In diesen Kondensator fliesst der Strom jedesmal ab, wenn der Stromleiter unterbrochen wird. Der Kondensator hat erstens den Zweck, den Stromleiter schneller zu unterbrechen,

Digitized by Google

indem er den Funken des »Extra-Stromes« (welcher von Selbst-Induktion in der primären Rolle herrührt; Art. 404) daran hindert, an dem Unterbrecher überzuspringen; und zweitens, die Elektrizität dieses selbst induzierten Extrastromes aufzuspeichern, damit der Strom, wenn der Stromleiter wieder geschlossen wird, nicht plötzlich, sondern allmählich wieder zu seiner vollen Stärke gelangt, wodurch die Induktion in dem sekundären Stromleiter beim »Schliessen« verhältnismässig schwach wird.

399. Ruhmkorff's Kommutator. Um den Batterie-Strom nach Belieben unterbrechen oder seine Richtung umkehren zu können, konstruierte Ruhmkorff den in Fig. 149 ab-

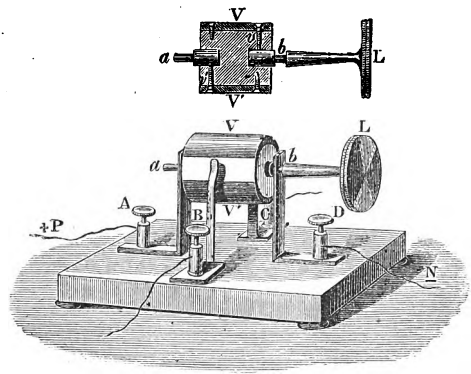

Fig. 149.

gebildeten Kommutator oder Stromwender. Bei diesem Apparate sind die Batteriepole durch die Enden der Achse eines kleinen Zylinders von Elfenbein oder Ebenholz mit zwei Metallblättern V und V' verbunden, welche so gedreht werden können, dass sie mit 2 vertikalen Federn B und C in Berührung kommen, welche mit den Enden der primären Rolle in Verbindung stehen. Es gibt noch zahlreiche andere Formen des Kommutators; eine derselben, welche als Schlüssel in der Telegraphie häufig verwendet wird, ist in Fig. 159 abgebildet,

Digitized by Google

400. Lichtwirkungen der Induktions-Funken. Das Induktorium liefert eine rasche Aufeinanderfolge von Funken, an denen alle Wirkungen der Funkenentladung studiert werden können. Diese Funken unterscheiden sich bloss graduell von den Funken der Reibungselektrisiermaschine oder der Leydener Flasche. (Vergl. Vorl. XXIII: die Erscheinungen der Entladung).

Einen grossen Nutzen gewährt das Induktorium bei der Untersuchung einer Entladung durch Glasgefässe oder Röhren, welche mit verdünnter Luft erfüllt sind. Fig. 150 veranschaulicht einen der zahlreichen schönen Versuche, wo der Funke sich in dem verdünnten Gase zu glänzenden Lichtflächen ausdehnt, und »Streifen« und andere komplizierte Erscheinungen auftreten.

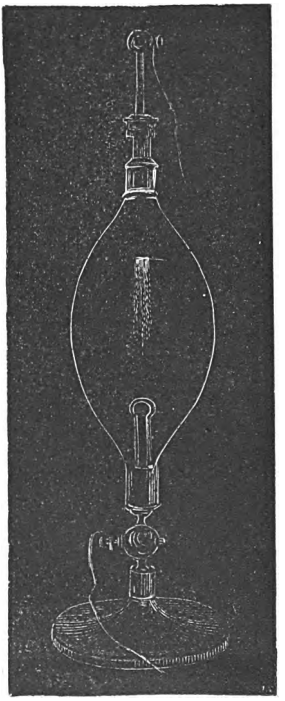

Fig. 150.

401. Ströme, welche in Metallmassen induziert werden. Wird ein Magnet in der Nähe einer kompakten Metallplatte bewegt, so induziert er Ströme, welche durch dieselbe von einem Punkte zum andern fliessen und ihre Energie hierbei eventuell in Wärme umsetzen, und welche, so lange sie dauern (in Uebereinstimmung mit dem Gesetze von Lenz) elektromagnetische Kräfte erzeugen, die die Bewegung zu hemmen bestrebt sind. Wir kennen hiervon verschiedene merkwürdige Beispiele. Wird eine Kupferscheibe in ihrer eigenen Ebene unterhalb einer Magnetnadel in Rotation versetzt, so gerät die Nadel, wie Arago entdeckte, ebenfalls in drehende Bewegung und folgt der Scheibe; und wird ein Magnet unterhalb einer ba-

Digitized by Google

lancierenden Metallscheibe in Rotation versetzt, so folgt die Scheibe dem Magnet. Man suchte nach einer Erklärung für diese unter dem Namen der *Arago'schen Rotationen* bekannten Erscheinungen, indem man annahm, dass es eine Art Rotationsmagnetismus gäbe, bis Faraday bewies, dass dieselben eine Folge der Induktion seien. Eine in Schwingungen versetzte Magnetnadel kommt schneller zur Ruhe, wenn unterhalb derselben sich eine Kupferscheibe befindet, da die induzierten Ströme die Bewegung hemmen. Wird ein Würfel oder eine Scheibe eines gut leitenden Metalls zwischen den Polen eines Elektromagnets von der in Fig. 127 abgebildeten Form in Drehung versetzt, und der Strom in den Rollen des Elektromagnets dann plötzlich erregt, so kommt das rotierende Metall sofort zur Ruhe. Wird eine Scheibe zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets durch eine Kraft in drehender Bewegung erhalten, so erwärmt sich jene infolge der induzierten, durch sie fliessenden Ströme. In der That erleidet jeder Leiter, der durch eine Kraft quer durch die Kraftlinien eines magnetischen Feldes bewegt wird, einen mechanischen Widerstand, welcher von den seiner Bewegung widerstrebenden induzierten Strömen herrührt.

402. Induktionsströme, welche durch den Erdmagnetismus erzeugt werden. Es ist nicht schwierig, vom Erdmagnetismus induzierte Ströme zu erhalten. Eine Rolle aus dünnem Drahte, welche mit einem empfindlichen Galvanometer in Verbindung steht, durchschneidet beim raschen Umkehren die Kraftlinien des Erdmagnetismus und wird infolge dessen von einem Strome durchflossen.

Faraday benutzte in der That diese Methode, um die Richtung und Anzahl der Kraftlinien zu bestimmen. Wird eine kurze Spirale mit einem empfindlichen Galvanometer zu einem Stromkreise verbunden, welches eine schwere Nadel von grosser Schwingungsdauer hat, und wird die kurze Spirale, welche sich in einem magnetischen Felde befindet, plötzlich um 180° gedreht, so durchschneidet sie alle Kraftlinien, welche durch ihre

Digitized by Google

eigene Fläche hindurchgehen, und der sinus des halben Winkels der ersten Schwingung der Galvanometernadel (vergl. Art. 204) ist der Anzahl der geschnittenen Kraftlinien proportional; denn bei einer langsam schwingenden Nadel ist die gesamte Elektrizitätsmenge, welche durch die Rollen fliesst, gleich der Summe aller einzelnen Mengen, welche die starken oder schwachen induzierten Ströme liefern, die während des schnellen Prozesses des Schneidens der Kraftlinien im Stromleiter fliessen; und die kleine Spirale wirkt daher als eine *magnetische Versuchs-Platte.*

Wird der Stromleiter parallel mit sich selbst durch ein gleichförmiges magnetisches Feld bewegt, so treten keine Induktionsströme auf, denn es werden genau so viel Kraftlinien bei der Bewegung nach der einen Seite durchschnitten, als auf der andern Seite zurückbleiben. Ebenso entsteht kein Strom, wenn ein Draht parallel mit sich selbst einer Kraftlinie entlang geführt wird; auch wirkt keine mechanische Kraft auf den Draht, wenn er neben einer solchen Linie liegt und ein Strom durch denselben geschickt wird.

403. Erdströme. Die in Vorl. XII erwähnten Schwankungen des Erdmagnetismus ändern die Anzahl der Kraftlinien, welche durch die Telegraphendrähte führen, und induzieren also in ihnen Störungen, welche unter dem Namen von »Erdströmen« bekannt sind. Zur Zeit eines magnetischen Sturmes haben die Erdströme in den brittischen Telegraphendrähten, wie nachgewiesen ist, eine Stärke von 40 Milli-Ampère erreicht, ein Strom, der die gewöhnlichen Arbeitsströme an Stärke übertrifft. Schwache Erdströme werden täglich beobachtet und sind ihrem Charakter nach mehr oder weniger periodisch.

404. Selbst-Induction: Extra-Ströme. In Art. 397 wurde die Induktion eines Stromleiters auf einen andern erklärt und nachgewiesen, dass dieselbe von der Zahl der Kraftlinien abhängt, welche von dem einen Stromleiter herrühren und den andern durchschneiden, wobei der Koeffizient der gegenseitigen Induktion, M, die Anzahl der gegenseitigen Kraft-

Digitized by Google

linien ist, die beide Stromleiter einschliessen, vorausgesetzt, dass jeder vom Einheitsstrome durchflossen wird. Wenn nun zwei derartige Stromleiter sich einander so weit nähern, dass sie thatsächlich zusammenfallen, so wird die *gegenseitige* Induktion eine **Selbstinduktion** des Stromleiters auf sich selbst. Jeder Stromleiter hat einen *Koeffizienten der Selbstinduktion*, dessen Wert von der Gestalt des Stromleiters abhängt und der grösser wird, wenn der Stromleiter mehrere Windungen enthält, so dass eine Schlinge des Stromleiters Kraftlinien induzieren kann, welche durch eine andere Schlinge desselben Stromleiters hindurchgehen. Es sei L der Koeffizient der Selbstinduktion eines Stromleiters, und L' derjenige eines andern von gleicher Länge. Fallen diese beiden Stromleiter mit einander zusammen, so ist ihr Koeffizient der gegenseitigen Induktion (d. h. die Anzahl der Kraftlinien, welche durch beide Stromleiter gehen, wenn jeder den Einheitsstrom führt) $M = L + L'$ oder $L = \frac{1}{2} M$. Nun ist für zwei zusammenfallende Stromleiter, von denen jeder n Windungen hat und die Fläche S einschliesst, nach Art. 397:

$$M = 4\pi S n^2;$$

folglich ist der Koeffizient der Selbstinduktion für einen Stromleiter von n in derselben Ebene liegenden Windungen:

$$L = 4\pi S n^2$$

Die Existenz der Selbstinduktion in einem Stromleiter wird durch den sogenannten **Extrastrom** bestätigt, welcher als glänzender Funke in dem Augenblicke erscheint, wo der Stromleiter unterbrochen wird. Ist der Stromleiter einfach und besteht derselbe aus einem geraden Drahte und einem ihm parallelen, welcher zur Batterie zurückführt, so findet gar keine oder nur geringe Selbstinduktion statt; ist der Stromleiter aber gewunden, besonders wenn er um einen eisernen Stab gewunden ist, wie bei einem Elektromagnet, so erscheint beim Unterbrechen des Stromes ein glänzender Funke, und derjenige, welcher die beiden Drahtenden hält, zwischen denen der Strom unterbrochen wird, erleidet einen kleinen Schlag, welcher von der hohen elektromotorischen Kraft dieses selbstinduzierten Extrastromes

Digitized by Google

herrührt. Derjenige Extrastrom, welcher durch Selbstinduktion beim »Schliessen« des Stromleiters entsteht, ist ein umgekehrter Strom und gibt keinen Funken, aber er bewirkt, dass der Batterie-Strom nicht sofort seine volle Stärke erreicht. Der Extrastrom, welcher beim Unterbrechen des Stromes entsteht, ist ein direkter Strom, und erhöht daher die Stärke des Stromes gerade in dem Augenblicke, wo derselbe überhaupt ganz aufhört.

405. Die Helmholtz'schen Gleichungen. von Helmholtz untersuchte auf mathematischem Wege den Einfluss der Selbstinduktion auf die Stromstärke und leitete folgende wichtige Gleichungen ab, welche das Verhältnis der Selbstinduktion eines Stromleiters zu der Zeit angeben, welche erforderlich ist, damit der Strom seine volle Stärke erlangt.

Der Strom der Selbstinduktion ist in jedem Augenblicke der Zunahme der Stromstärke proportional. Es bedeute τ ein sehr kurzes Zeitintervall, in welchem der Strom von C auf $C + c$ wachsen möge. Die wirkliche Zunahme während des Intervalls ist c und die Geschwindigkeit, mit welcher die Stromstärke zunimmt, ist $\frac{c}{\tau}$. Bezeichnet man den Koeffizienten der Selbstinduktion mit L, so ist also die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion $- L \frac{c}{\tau}$ und, wenn R der gesamte Widerstand des Stromleiters ist, so beträgt die Stärke des entgegengesetzten Extrastromes $- \frac{L}{R} \cdot \frac{c}{\tau}$ während des kurzen Intervalls τ; und folglich ist die wirkliche Stärke des Stromes, welcher in dem Stromleiter während jenes kurzen Intervalls fliesst, nicht $C = \frac{E}{R}$ (wie das Ohm'sche Gesetz ergeben würde, wenn der Strom konstant wäre), sondern

$$C = \frac{E}{R} - \frac{L}{R} \cdot \frac{c}{\tau}.$$

Um die Stromstärke zu finden, welche der Strom nach der Zeit t erreicht haben wird, wo t aus einer Anzahl solcher

Digitized by Google

kleinen Intervalle besteht, ist eine Anwendung der Integralrechnung erforderlich, welche sofort folgendes Resultat liefert:

$$C = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

(wo e die Basis der natürlichen Logarithmen). In Worten heisst dies, dass nach Verlauf von t Sekunden *die Selbstinduktion in einem Stromleiter beim Schliessen desselben die Stromstärke um eine Grösse von folgender Beschaffenheit vermindert: der Logarithmus vom reciproken Werte dieser Grösse ist dem Koeffizienten der Selbstinduktion umgekehrt, und dem Widerstande des Stromleiters und der Zeit, welche seit dem Schliessen des Stromleiters verflossen ist, direkt proportional.*

Eine kurze Ueberlegung lässt erkennen, dass für den Fall, wo der Koeffizient der Selbstinduktion L im Verhältnis zum Widerstande R klein ist, und der Bruch $\frac{R}{L}$ also einen grossen Wert hat, der Ausdruck $e^{-\frac{R}{L}t}$ für alle messbaren Werte von t aus der Gleichung verschwindet.

Wo jedoch L im Vergleich zu R gross ist, wie bei langen Spiralen, langen Telegraphenlinien etc., kann der Wert dieses Ausdrucks, welcher *die durch Selbstinduktion erzeugte Verzögerung* bedeutet, ein beträchtlicher sein.

406. Induktionsströme höherer Ordnung. Professor Henry machte die Entdeckung, dass die Schwankungen in der Stärke des sekundären Stromes in einem dritten geschlossenen Stromleiter tertiäre Ströme, und dass Schwankungen in der Stärke tertiärer Ströme solche vierter Ordnung induzieren können und so weiter. Ein einziger plötzlich geschlossener primärer Strom erzeugt deshalb zwei sekundäre Ströme (einen entgegengesetzt und einen gleich gerichteten), jeder von diesen erzeugt zwei tertiäre Ströme, beide zusammen also vier tertiäre Ströme. Wenn jedoch die Stärke des primären Stromes periodisch steigt und fällt — wie dies der Fall ist, wenn ein musikalischer Ton durch ein Mikrophon oder Telephon übertragen wird (Art. 435), — so ist die Anzahl der sekundären und tertiären Ströme gleich

Digitized by Google

der der primären, wobei jede einzelne Induktion jedoch eine Verzögerung des vierten Teiles der ganzen Periode involviert.

XXXVII. VORLESUNG: *Magnetelektrische und dynamo-elektrische Maschinen.*

407. Faraday's Entdeckung, dass in einem Drahte, welcher in einem magnetischen Felde bewegt wird, ein Strom induziert wird, führte zur Konstruktion von **magnetelektrischen Maschinen**, um mit denselben statt mit Volta'schen Batterieen Ströme zu erzeugen. Bei den ersten Versuchen von Pixii (1833), Saxton und Clarke, wurden Spulen von isoliertem Drahte auf einer Achse befestigt und vor den Polen starker Stahlmagnete in schnelle Rotation versetzt. Da jedoch die auf diese Weise erzeugten Ströme abwechselnd entgegengesetzte Richtung hatten, wurde ein *Kommutator* (welcher mit den Spiralen rotirte), an der Achse befestigt, damit die successiven Ströme sämtlich dieselbe Richtung erhielten. Die kleinen magnetelektrischen Maschinen, welche noch heute bei Mechanikern käuflich sind, beruhen auf diesem Prinzipe. Holmes und van Malderen konstruierten kräftigere Maschinen, wobei es dem letztern gelang, näherungsweise einen kontinuierlichen Strom zu erhalten, indem er 64 einzelne Rollen an einer gemeinschaftlichen Achse befestigte und dieselben zwischen den Polen von 4 kräftigen Magneten rotieren liess.

Im Jahre 1856 erfand Siemens eine verbesserte Armatur, bei welcher die Drahtrollen *der Länge nach* um eine Spindel von besonderer Form gewunden wurden, wobei er den Vorteil hatte, dass er eine grössere Anzahl von Kraftlinien durchschneiden konnte, wenn die Rollen in einem kräftigen »Felde« zwischen den Polen einer Reihe von neben einander befindlichen Stahlmagneten rotierten. Die nächste von Wilde herrührende Verbesserung war die Verwendung von Elektromagneten an Stelle der Stahlmagnete, welche das »Feld« erzeugten, in welchem die Armatur rotierte; diese Elektromagnete wurden

Digitized by Google

durch Ströme erzeugt, welche eine kleine magnetelektrische Hilfsmaschine lieferte, die ebenfalls in Rotation erhalten wurde.

408. Dynamo-elektrische Maschinen. Im Jahre 1867 wiesen gleichzeitig, jedoch unabhängig von einander Siemens und Wheatstone darauf hin, dass eine zwischen den Polen eines Elektromagnets rotierende Rolle in Folge des schwachen zurückgebliebenen Magnetismus einen kleinen Strom induzieren könnte, welcher, durch die Spiralen des Elektromagnets geleitet, dessen Magnetismus verstärken und denselben dadurch fähig machen könnte, noch stärkere Ströme zu induzieren. Die nach diesem Prinzipe konstruierten magnetelektrischen Maschinen, bei denen die Rollen der Elektromagnete nebst den Rollen der rotierenden Armatur in denselben Stromkreis eingeschaltet werden, so dass sie von dem ganzen oder von einem Teile des induzierten Stromes durchflossen werden, nennt man **dynamo-elektrische** Maschinen oder Generatoren, zum Unterschiede von denjenigen Generatoren, bei denen permanente Stahlmagnete Verwendung finden. In beiden Fällen rührt der Strom von magnetelektrischer Induktion her; ebenso stammt in beiden Fällen die Energie der auf diese Weise induzierten Ströme von der dynamischen Kraft der Dampfmaschine oder eines andern Motors, welcher die Arbeit verrichtet, die rotierenden Drahtrollen in dem magnetischen Felde in Bewegung zu setzen. Von den vielen nach diesem Prinzipe in neuerer Zeit konstruierten Maschinen sind die berühmtesten die von Siemens, Gramme, Brush und Edison. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch die Art und Weise, auf welche wirkliche Kontinuität des Stromes erzielt wird. Bei allen ist die erzeugte elektromotorische Kraft der Anzahl der Drahtwindungen der rotierenden Armatur und (innerhalb gewisser Grenzen) der Umdrehungsgeschwindigkeit proportional. Sind Ströme von geringer elektromotorischer Kraft, aber von bedeutender Stärke erforderlich, wie bei galvanischen Metallniederschlägen (Galvanoplastik), so muss der innere Widerstand der rotierenden Armaturen eines Generators gering sein und diese dürfen daher nur wenige Windungen von

Digitized by Google

starkem Drahte oder von bandförmigen Kupferstreifen enthalten. Um Ströme von hoher elektromotorischer Kraft zum Zwecke der elektrischen Beleuchtung zu erzeugen, muss die Armatur in sehr schnelle Rotation versetzt werden und aus zahlreichen Drahtwindungen bestehen oder für den Fall, wo ein sehr geringer Widerstand erforderlich ist (wie bei einem Systeme von Lampen, welche parallel geschaltet sind) muss die Armatur aus in geeigneter Weise verbundenen Kupferstäben bestehen.

Man kann die Spiralen auf der rotierenden Armatur in verschiedener Weise anordnen und es lassen sich darnach folgende gebräuchliche Methoden unterscheiden:

1) Trommel-Armaturen, bei denen die Rollen longitudinal um die Oberfläche eines Cylinders oder einer Trommel gewunden sind; Beispiel: Die Maschinen von Siemens (Alteneck) und Edison.

2) Ring-Armaturen, bei denen die Rollen um einen Ring gewunden sind. Beispiele: Die Maschinen von Pazinotti, Gramme, Brush, Gülcher und Bürgin.

3) Pol-Armaturen, bei denen die Rollen strahlenförmig angeordnet sind, so dass ihre Pole nach aussen weisen. Beispiel: Maschine von Lontin.

4) Scheiben-Armaturen, wo die Rollen in oder auf einer Scheibe angebracht sind. Beispiele: Niaudet, Wallace, Hopkinson und Gordon. Bei einer älteren Maschine von Faraday wurde ein kontinuierlicher Strom durch eine einfache Kupferscheibe erzeugt, welche zwischen den Polen eines Magnets rotierte.

Auch die Spulen der Elektromagnete lassen sich in verschiedener Weise anbringen und darnach unterscheidet man folgende Systeme:

1) Serien-Dynamo-Maschinen, wo die Rollen der Elektromagnete mit denen der Armatur und des äussern Stromleiters hinter einander geschaltet sind.

2) Dynamo-Maschinen mit Nebenschluss, wo die Rollen des Elektromagnets einen oder mehrere Nebenschlüsse zum Hauptstrome bilden; da dieselben aus zahlreichen Windungen eines dünnern Drahtes bestehen, so nehmen sie nur einen Teil des ganzen Stromes auf.

3) Dynamo-Maschinen mit separatem Erreger; hier stammen die zur Erzeugung der Elektromagnete benutzten Ströme von einer besondern Maschine.

4) Zusammengesetzte Dynamo-Maschinen (Compound-Maschinen), welche teils durch Rollen im Nebenschluss, teils durch Serien-Rollen (d. h. in den Hauptstrom geschaltete) getrieben werden.

Digitized by Google

Alle diese verschiedenen Arten finden je nach Umständen ihre besondere Verwendung.

409. Die Maschine von Siemens. Der dynamo-elektrische Generator, welchen Siemens und von Hefner Alteneck erfunden haben, und der gewöhnlich die **Maschine von Siemens** genannt wird, ist in Fig. 151 abgebildet. An einem starken

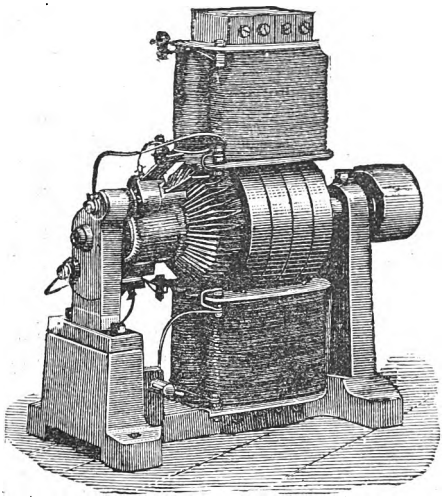

Fig. 151.

Rahmen sind 4 kräftige platte Elektromagnete befestigt, von denen die beiden auf der rechten Seite ihre N-Pole einander zukehren und durch Bögen oder eiserne Klammern verbunden sind. Die beiden S-Pole des linken Paars sind in ähnlicher Weise verbunden. In dem Raume zwischen der rechten und linken Klammer, welcher also ein sehr intensives magnetisches Feld ist, befindet sich eine horizontale Achse, um welche eine aus 56 einzelnen longitudinalen Rollen bestehende Armatur rotiert, wobei jedes Ende jeder Rolle mit einem Kupferstabe in Verbindung steht, welcher ein Segment des *Kollektors* oder *Kommutators* an dem vorderen Ende der Achse bildet. Diese Armatur unterscheidet sich von der alten einfachen longitudinalen

Digitized by Google

Armatur von Siemens nur durch die Vervielfältigung und Anordnung ihrer Teile; die Teilung in so zahlreiche Abteilungen liefert dann einen wirklich kontinuierlichen Strom. Der Kollektor, welcher, wie gesagt, aus kupfernen Stäben oder Segmenten besteht, die an einem Cylinder aus isolierendem Stoffe befestigt sind, kann als eine aufgespaltene Röhre betrachtet werden. Der Strom kann nicht von einem Segmente zu dem nächstfolgenden übergehen, ohne eine der 56 Rollen der Armatur zu durchfliessen; und da das Ende der einen Spirale mit dem Anfang der folgenden durch denselben Kommutatorstab verbunden ist, so besteht eine kontinuierliche Verbindung rings um die ganze Armatur. Gegen den Kommutator drücken ein Paar Metallbürsten oder Federn, als Kontaktstücke, welche an entgegengesetzten Stellen oben und unten die Berührung herstellen, und auf diese Weise den in den Spiralen der rotierenden Armatur erzeugten Strom in den übrigen Stromkreis weiter fortleiten. Angenommen, die Kraftlinien des Feldes verliefen von rechts nach links [1]), und die Armatur rotiere nach der Linken, wie in Fig. 151, dann werden in Folge der in Art. 395 angegebenen Regel in allen einzelnen Drähten der Rollen, welche sich auf der Rechten aufwärts bewegen, Ströme induziert, welche von hinten nach vorn gerichtet sind. In allen einzelnen Drähten der Rollen, welche zur Linken der Achse sich abwärts bewegen, fliessen die induzierten Ströme in der Richtung von vorn nach hinten. Wenn also die Rollen in der angegebenen Weise mit den Kommutatorstäben verbunden wer-

1) Sie haben nicht ganz genau diese Richtung, wenn der Generator in Thätigkeit ist, weil die magnetische Kraft, welche von den Strömen in den Rollen herrührt und welche eine fast horizontale Richtung hat, die resultierende magnetische Kraft so ändert, dass sie in schräger Richtung durch das Feld geht. Aus diesem Grunde müssen die Kommutator-»Bürsten« in schräger Richtung angebracht werden. Eine ähnliche Verschiebung der Bürsten findet bei dem Gramme'schen und allen übrigen dynamo-elektrischen Generatoren statt, wobei die Grösse der zum Maximum der Stromstärke erforderlichen Verschiebung von den Widerständen in dem äussern Stromleiter und der vom Strome verrichteten Arbeit abhängt.

Digitized by Google

den, so fliessen alle Ströme, welche auf diese Weise in der einen Hälfte der Rollen erzeugt werden, *in* den äussern Stromleiter an einer der Kommutatorbürsten; und alle entgegengesetzt gerichteten Ströme in der andern Hälfte der Rollen fliessen dann *an* der andern Bürste *heraus*. Die Endschrauben, welche durch Drähte mit den Kommutatorbürsten verbunden sind, entsprechen dem + und — Pole einer galvanischen Batterie, da die Rollen der Elektromagnete sich im äussern Stromkreise befinden.

410. Die Maschine von Gramme. Im Jahre 1864 erfand Pazinotti eine magnet-elektrische Maschine, deren Armatur aus einem gezahnten *Eisenring* bestand, und deren Rollen zwischen die Zähne gewunden waren. Gramme erfand im Jahre 1870 eine dynamo-elektrische Maschine, deren Ringarmatur sich von jener nur dadurch unterschied, dass dieselbe vollständig mit Rollen von isolierten Kupferdrähten bedeckt war. Das Prinzip dieses Generators veranschaulicht das Diagramm in Fig. 152. Der Ring selbst, welcher aus einem Bündel aus-

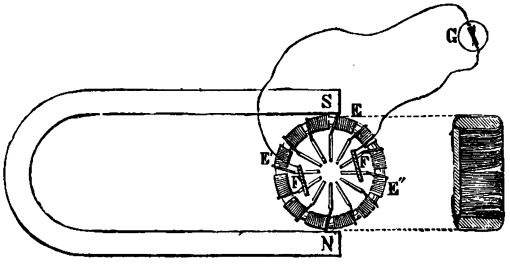

Fig. 152.

geglühter Eisendrähte besteht, wird in einzelnen Abschnitten umwickelt, und die Enden jeder Rolle werden mit Kupferstreifen verbunden, welche von einander isoliert sind und als Kommutator symmetrisch um die Achse befestigt sind, wie eine *gespaltene Röhre*. Ihre wirkliche Aufstellung zeigt Fig. 153. Die Rollen der einzelnen Abschnitte des Ringes sind hinter einander geschaltet, indem jeder Streifen des Kommutators mit

Digitized by Google

zwei Enden zweier benachbarten Spiralen verbunden ist. Gegen den Kollektor der Spaltröhre drücken Metallbürsten, um den Strom aufzunehmen. Wenn dieser Ring rotiert, so gestaltet sich die Wirkungsweise folgendermassen: Angenommen, der Ring (Fig. 152) rotiere in dem magnetischen Felde zwischen dem N- und S-Pole eines Magnets (oder Elektromagnets) in der entgegengesetzten Richtung, wie die Zeiger einer Uhr, und die positive Richtung der Kraftlinien sei von N nach S. Diese Linien gehen thatsächlich nicht in gerader Linie von N nach S, da der grössere Teil derselben in den Ring bei N eintritt und durch das Eisen des Ringes bis in die Nähe von S hindurchgeht, wo sie wieder zum Vorschein kommen; der Raum innerhalb des Ringes hat fast gar keine Kraftlinien. Wir betrachten eine einzelne Drahtrolle, welche bei E'' um den Ring gewickelt ist und nach S aufsteigt; die grösste Anzahl von Kraftlinien wird durch ihre Ebene gehen, wenn sie in der Nähe von E'' rechtwinklig zu der Linie NS liegt. Je mehr sie nach S aufsteigt und in die Nähe von E gelangt, um so mehr wird die Zahl der sie durchschneidenden Kraftlinien abnehmen, bis sie ganz dicht bei S von keiner der Kraftlinien mehr durchschnitten wird und in der Linie NS liegt. Bei ihrer Bewegung nach E' wird die Rolle wieder Kraftlinien in sich aufnehmen, die jetzt jedoch in negativer Richtung durch ihre Ebene führen, und bei E' wird die Zahl dieser negativen Kraftlinien ein Maximum. Folglich hat die Zahl der (positiven) Kraftlinien, welche eine Abteilung der Rollen umfasst, auf dem ganzen Wege von E'' bis E' beständig abgenommen; auf dem Wege um die andere Hälfte von E' bis E'' nimmt die Zahl wieder zu. Deshalb werden nach der in Art. 395 angegebenen Regel in allen Rollen, welche sich an der oberen Hälfte des Ringes bewegen, *direkte* Ströme erzeugt, während in den Rollen der untern Hälfte des Ringes *umgekehrte* Ströme erzeugt werden. Demnach hat die Elektrizität beständig das Bestreben, von dem Punkte E' der linken Seite durch beide Hälften des Ringes nach E'' auf der rechten Seite zu fliessen, so dass E'' ein höheres Potential hat,

Digitized by Google

als E', und folglich wird in einem äussern Drahte, der mittelst Bürsten in F und F in Kontakt steht, ein kontinuierlicher Strom erzeugt. In Fig. 153 ist eine kleine, circa 50 cm hohe Maschine von Gramme abgebildet, die zur Erzeugung eines elektrischen Bogenlichtes geeignet ist, falls dieselbe durch eine Maschine von $2\frac{1}{2}$ Pferdekräften getrieben wird. Oben und unten befinden sich einander gegenüber kräftige Elektromagnete, deren eiserne Polstücke vorragen und beinahe bis in die Mitte der Ringarmatur reichen. Diese ist nebst dem Kommutator an der horizontalen Spindel befestigt.

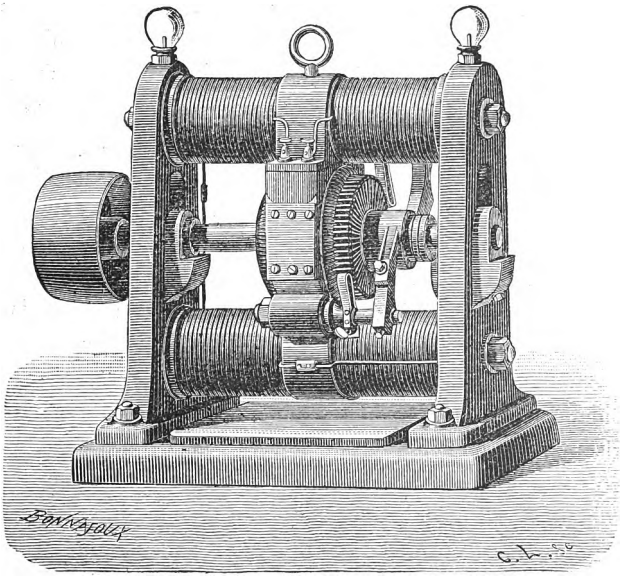

Fig. 153.

411 a. **Maschine von Brush.** Bei dem dynamo-elektrischen Generator von Brush findet ebenfalls eine Ringarmatur Anwendung, die ihrer Form nach mit der von Pacinotti erfundenen übereinstimmt; der eiserne Ring hat noch vorstehende Ränder, zwischen denen die Rollen liegen; diese selbst sind in etwas anderer Weise verbunden, indem jede Rolle mit der ihr

Digitized by Google

diametral gegenüberliegenden verbunden ist, und beide einen Kommutator haben, der aus einem in zwei Teile gespaltenen Rahmen besteht. Jedes Rollenpaar hat einen solchen Rahmen und die einzelnen Rahmen sind in der Weise vereinigt, dass sie die beim Rotieren angesammelten Ströme an zwei oder mehrere Paare von Bürsten abgeben, an denen sie sich reiben. Die elektromotorische Kraft dieser Maschinen ist sehr gross, und dieselben sind daher im Stande, einen Strom durch eine lange Reihe von Bogenlichtlampen zu schicken, welche hinter einander verbunden sind. Die grössten Brush-Maschinen, welche 40 Bogenlichte unterhalten können, haben eine elektromotorische Kraft von mehr als 2000 Volt. Dynamo-Maschinen mit veränderter Ringarmatur haben ferner Gülcher, Schuckert und andere erfunden. Bei den Maschinen von Gülcher und Schuckert erhält die Ringarmatur die Gestalt einer platten Scheibe. Bei der Maschine von Bürgin besteht die Armatur aus acht bis zehn Ringen, von denen jeder aus einem einfachen hexagonalen Eisendraht besteht und welche alle neben einander so an einer Achse befestigt sind, dass jeder Ring etwas über den vorhergehenden vorsteht. Bei Crompton's Dynamo-Maschine ist die Armatur um einen hohlen cylindrischen Kern gewunden, der aus flachen dünnen Eisenringen gebildet ist.

Siemens und Andere haben eine zweite Klasse von dynamo-elektrischen Maschinen erfunden, welche von den vorhergehenden vollständig verschieden sind und bei denen eine Spirale oder ein anderer beweglicher Konduktor um einen Magnetpol gleitet und die Kraftlinien in kontinuierlicher Weise schneidet, bei gleichbleibender Richtung der induzierten Ströme. Solche Maschinen, welche häufig »Unipolar-Maschinen« genannt werden, haben jedoch eine sehr geringe elektromotorische Kraft.

Alle magnet-elektrischen und dynamo-elektrischen Maschinen mit kontinuierlichen Strömen können als Elektromotoren benutzt werden, da die Armatur mit bedeutender Kraft rotiert, wenn ein Strom aus einer von der Maschine unabhängigen Quelle in dieselbe geleitet wird.

Digitized by Google

411 b. Maschine von Edison. Die grössten dynamo-elektrischen Generatoren, welche bisher verfertigt worden, sind die von Edison für sein

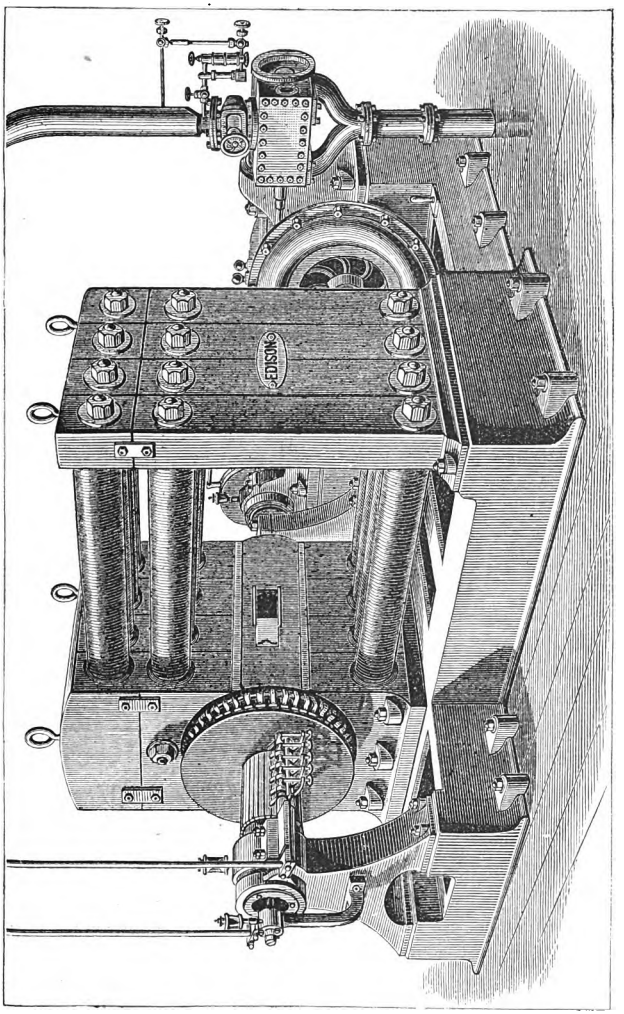

Fig. 154.

System der elektrischen Beleuchtung konstruierten. Diese Maschine (Fig. 154) ist auf demselben Fundament aufgebaut, wie die sie treibende Dampfmaschine (von 120 Pferdekräften) und wird von ihrem Erfinder die *Dampf-Dynamo-*

Digitized by Google

maschine genannt. Die Elektromagnete liegen horizontal und bestehen aus 12 cylindrischen, mit Draht umwickelten Eisenstäben, welche mit soliden eisernen Polstücken von mehreren Zentnern Gewicht verbunden sind. Zwischen den obern und untern Polstücken rotiert die Armatur, welche eine Modifikation der Trommelarmatur von Siemens ist, und aus 98 langen Kupferstäben besteht, deren Enden nicht durch Drahtrollen, sondern durch Kupferscheiben verbunden sind. Der Kommutator oder Kollektor besteht aus 49 parallelen Kupferstäben, wie der Spaltröhren-Kommutator der übrigen Maschinen. Der Stromkreis der Armatur führt von einem Stabe des Kommutators an einem der Kupferstäbe entlang nach einer Kupferscheibe am entfernteren Ende, geht quer über diese Scheibe zum gegenüberliegenden Stabe und führt längs desselben zum vordern Ende zurück nach einer zweiten Kupferscheibe, die mit dem nächsten Stabe des Kommutators verbunden ist, und so weiter. Durch diese Anordnung wird der verderbliche Widerstand der Armatur bedeutend reduziert, und die Leistungsfähigkeit der Maschine erhöht. Das Innere der Armatur besteht aus dünnen Eisenscheiben, welche an der Achse befestigt sind; dieselben verstärken die magnetische Wirkung, während sie die Ströme verhüten, welche in der Masse des Metalls unnütz erzeugt würden (vergl. Art 401), wäre der Eisenkern solid. An dem Kommutator befinden sich auch 5 Paare von Bürsten, um das Funkensprühen zu vermindern. Diese Maschine hat eine sehr grosse Leistungsfähigkeit und setzt 90 Prozent der mechanischen Kraft in elektrische Kraft um. Sie ist im Stande, gleichzeitig 1300 Edison'sche Glühlichtlampen (Art. 374) zu versehen. Macht die Armatur in der Minute 300 Umdrehungen, so ist der erzeugte Strom circa 900 Ampère stark, und die elektromotorische Kraft beträgt 105 Volt.

411 c. **Wechselstrom-Maschinen.** Bei einigen dynamo-elektrischen Maschinen wird die alternierende Richtung der Ströme, welche durch die successive Annäherung und Entfernung der Rollen von den festen Magnetpolen erzeugt werden, überhaupt nicht durch Kommutieren gleich gemacht, sondern es gehen die Ströme direkt in den Stromkreis über. Bei einem Modell dieser von Wilde erfundenen Maschinen besteht die Armatur aus einer Reihe von Spulen, welche an der Peripherie einer Scheibe befestigt sind. Die Scheibe rotiert zwischen zwei Reihen fester Magnetpole, die an kreisförmigen Rahmen befestigt sind, und ihre N- und S-Pole abwechselnd nach innen kehren. Die Maschine mit alternierenden Strömen von Siemens beruht auf einem ähnlichen Prinzipe. Solche Maschinen können ihre eigenen das Feld erzeugenden Magneten mit konstanter Polarität nicht erregen, und erfordern eine kleine Hilfs-Dynamomaschine mit direkten Strömen, um ihre Magnete zu erregen. Bei einer andern von De Meritens erfundenen Maschine bewegt sich eine Ringarmatur, welche denen von Pacinotti und Brush gleicht, vor permanenten Stahlmagneten. Bei dieser Ma-

Digitized by Google

schine folgt dem Strome, welcher in dem Stromkreise in einer Richtung induziert wird, während die Rollen sich der einen Polreihe nähern, unmittelbar ein Strom in der entgegengesetzten Richtung, sobald die Rollen sich von dieser Polreihe entfernen und sich der Reihe der entgegengesetzten Pole nähern. Maschinen mit alternierenden Strömen sind auch von Lontin, Gramme und andern konstruiert worden, welche bei besondern Systemen elektrischer Beleuchtung Anwendung finden, wie z. B. bei der Jablochkoff'schen Kerze (Art. 374). Bei der Lontin'schen Maschine rotieren ebenso wie bei der neuern und viel grössern Scheiben-Dynamomaschine von Gordon die Rollen der Elektromagnete zwischen zwei grossen Ringen von festen Rollen, in denen die Ströme induziert werden. Die neueste Art der Maschinen mit alternierenden Strömen, welche Ferranti angegeben hat, unterscheidet sich von den Maschinen von Wilde und Siemens dadurch, dass die Reihe der rotierenden Spulen der Armatur durch Kupferstreifen ersetzt ist, welche im Zickzack gewunden sind. Diese Konstruktion hatten vorher schon Hopkinson und Muirhead angewendet.

411 d. **Kombinierte Maschinen.** Die Elektromagnete einer dynamo-elektrischen Maschine werden bisweilen mit zwei verschiedenen Rollen umgeben, so dass die Maschine sowohl als Maschine mit Nebenschluss, wie als Serienmaschine (vergl. Art. 408) benutzt werden kann. Solche Maschinen können, falls sie sich mit einer bestimmten »kritischen« Geschwindigkeit bewegen, einen konstanten Strom liefern oder mit konstanter elektromotorischer Kraft arbeiten, unabhängig von den Widerständen im Stromkreise. Es ist auch möglich, durch Kombination beide Zwecke gleichzeitig zu erreichen, indem man in dem einen Falle eine Wickelung mit Nebenschluss, in dem andern eine Serienwickelung anwendet, mit einem unabhängigen Magnetismus, welcher entweder von einem permanenten Magnet oder von einem besonders erregten Elektromagnet stammt.

Digitized by Google

KAPITEL XI.

ELEKTRO-CHEMIE.

XXXVIII. VORLESUNG: *Elektrolyse und Elektrometallurgie.*

412. In der 14. und 18. Vorlesung wurde gezeigt, dass eine chemische Wirkung von bestimmter Grösse in einem Elemente einen Strom entwickelt und eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch den Stromleiter schickt, und dass umgekehrt eine bestimmte Elektrizitätsmenge beim Durchgange durch einen elektrolytischen Becher hier eine chemische Arbeit von bestimmter Grösse verrichtet. Ueber das Verhältnis des Stromes zu der von ihm verrichteten chemischen Arbeit geben die folgenden Paragraphen Aufschluss.

413. Elektromotorische Kraft der Polarisation. Jedesmal, wenn ein Elektrolyt von einem Strom zersetzt wird, haben die getrennten Jonen das Bestreben, sich wieder zu vereinigen; dieses Bestreben nennt man gewöhnlich »chemische Verwandtschaft« (chemische Affinität). Wird z. B. schwefelsaures Zinkoxyd ($ZnSO_4$) in Zn und SO_4 aufgelöst, so hat das Zink das Bestreben, sich in der Lösung in Folge seiner »Verwandtschaft« zum Sauerstoff und zur Schwefelsäure wieder aufzulösen. Löst sich aber Zink in Schwefelsäure auf, so entsteht dadurch eine elektromotorische Kraft von bestimmter Grösse; und um das Zink von der Schwefelsäure fern zu halten, ist eine elektromotorische Kraft erforderlich, die mindestens ebenso gross wie jene ist und die entgegengesetzte Richtung hat. Wird angesäuertes Wasser in einem Voltameter zersetzt, so haben wiederum die getrennten Wasserstoff- und Sauerstoffatome das Be-

Digitized by Google

streben, sich wieder zu vereinigen und rufen eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft von nicht weniger als 1,47 Volt hervor. Diese entgegengesetzte elektromotorische Kraft, welche thatsächlich ein Maass ihrer »chemischen Verwandtschaft« ist, heisst die elektromotorische Kraft der Polarisation. Dieselbe lässt sich in jedem Wasservoltameter (Art. 208) beobachten, indem man einfach die Verbindung der Drähte mit der Batterie unterbricht, und dieselben mit einem Galvanometer verbindet; man beobachtet alsdann einen Strom, welcher durch das Voltameter von der Wasserstoffelektrode nach der Sauerstoffelektrode zurückfliesst. Die Polarisation in einem Volta'schen Elemente (Art. 163) erzeugt eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft in ganz analoger Weise.

Da nun die Verwandtschaft des Wasserstoffs zum Sauerstoff durch eine elektromotorische Kraft von 1,47 Volt dargestellt wird, so ist klar, dass weder ein Element noch eine Batterie Wasser zersetzen kann, wenn dieselben nicht eine elektromotorische Kraft von *mindestens* 1,47 Volt besitzen. Bei jedem Elektrolyt ist ein Minimum von elektromotorischer Kraft erforderlich, um eine vollständige kontinuierliche Zersetzung zu erzeugen.

414. Theorie der Elektrolyse. Angenommen, ein Strom führe die Elektrizitätsmenge Q durch einen Stromleiter, in welchem eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft E besteht; die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn Q Elektrizitäts-Einheiten dieser elektromotorischen Kraft entgegen bewegt werden, ist gleich $E \times Q$. (Sind E und Q in »absoluten« C.G.S. Einheiten ausgedrückt, so bedeutet $E \times Q$ Arbeitseinheiten.) Die totale Energie des Stromes, welche zur Erzeugung von Wärme oder mechanischer Bewegung tauglich ist, wird um diese Grösse vermindert, welche die Arbeit darstellt, die gegen die in Frage kommende elektromotorische Kraft verrichtet wird.

Wir können aber noch in anderer Weise zu einem Ausdruck für dieselbe Arbeitsgrösse gelangen. Denn die Elektri-

Digitized by Google

zitätsmenge setzt bei ihrem Durchgange durch das Element eine bestimmte Menge von Metall ab; diese Metallmenge könnte verbrannt oder in Säure wieder aufgelöst werden, indem sie ihre potentielle Energie als Wärme von sich gibt, und da das mechanische Wärmeäquivalent bekannt ist, so kann die äquivalente Arbeitsmenge berechnet werden. Q Elektrizitäts-Einheiten bewirken die Ablagerung von Qz Gramm eines Jon, dessen absolutes elektrochemisches Aequivalent den Wert z hat. (Für Wasserstoff ist z. B. $z = 0{,}00010352$ Gramm, d. h. nach der Tabelle des Art. 212 der zehnfache Betrag, welcher von einem Coulomb abgesetzt wird, denn das Coulomb ist der zehnte Teil der absoluten C.G.S. Einheit der Elektrizitätsmenge.) Bedeutet H die Anzahl der Wärmeeinheiten, welche ein Gramm des Körpers entwickelt, wenn dasselbe die betreffende Verbindung eingeht, dann gibt QzH den (in Wärmeeinheiten ausgedrückten) Wert der chemischen Arbeit an, welche durch das Fliessen der Q Einheiten verrichtet wird; und dieser Wert kann ohne weiteres in Arbeitseinheiten verwandelt werden, wenn wir mit dem Joule'schen Aequivalente J ($= 42 \times 10^6$) multiplizieren. (Vergl. die Tabelle in Art. 422a.)

Es ergibt sich also folgende Gleichung:

$$EQ = QzHJ, \text{ folglich}$$
$$E = z.H.J$$

d. h. in Worten: *Die elektromotorische Kraft eines chemischen Prozesses ist gleich dem Produkte des elektrochemischen Aequivalentes des getrennten Jons und seiner in dynamischen Einheiten ausgedrückten Verbindungswärme.*

Beispiele: 1) Die elektromotorische Kraft des Wasserstoffs, welcher sich mit Sauerstoff zu verbinden strebt. Für Wasserstoff ist $z = 0{,}00010352$; H (Verbindungswärme eines Gramms) $= 34{,}000$ Gramm-Grad-Einheiten; $J = 42 \times 10^6$.

$0{,}00010352 \times 34{,}000 \times 42 \times 10^6 = 1{,}47 \times 10^8$ absolute Einheiten der elektromotorischen Kraft, oder $= 1{,}47$ Volt.

2) Elektromotorische Kraft des Zinks, welches sich in Schwefelsäure auflöst. $z = 0{,}003364$; $H = 1670$ (nach Julius Thomson); $J = 42 \times 10^6$

$0{,}003364 \times 1670 \times 42 \times 10^6 = 2{,}359 \times 10^8$ oder $= 2{,}359$ Volt.

Digitized by Google

3) Elektromotorische Kraft des Kupfers, welches sich in Schwefelsäure auflöst. $z = 0{,}003261$; $H = 909{,}5$; $J = 42 \times 10^6$;

$0{,}003261 \times 909{,}5 \times 42 \times 10^6 = 1{,}252 \times 10^8$ oder $= 1{,}252$ Volt.

4) Elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes. Hier wird an dem einen Pole Zink aufgelöst und es bildet sich schwefelsaures Zinkoxyd, so dass durch diesen chemischen Prozess eine + elektromotorische Kraft erzeugt wird; an dem andern Pole wird Kupfer durch den Strom aus einer Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd abgesetzt, und es entsteht dadurch eine entgegengesetzte (oder —) elektromotorische Kraft. Die des Zinks beträgt, wie oben gezeigt wurde, + 2,359 Volt, die des ausgeschiedenen Kupfers — 1,242. Folglich ist die resultierende elektromotorische Kraft des Elementes (bei Vernachlässigung der geringen elektromotorischen Kraft, welche an der Berührungsstelle der beiden Lösungen auftritt) 2,359 — 1,242 = 1,117 Volt. Dieser Wert stimmt annähernd mit dem in Art. 170 auf praktischem Wege gefundenen überein. Derselbe ist zur Elektrolyse des Wassers nicht ausreichend, dagegen vermögen 2 Daniell'sche Elemente, hinter einander geschaltet, das Wasser mit Leichtigkeit zu elektrolysieren.

415. Sekundäre Batterieen; Aufspeichern elektrischer Ströme. Ein Voltameter oder eine Reihe von Voltametern, deren Elektroden mit Wasserstoff, resp. Sauerstoff beladen sind, können als *sekundäre Batterieen* dienen, in denen die Energie eines Stromes (als chemische Arbeit) aufgespeichert und wieder gewonnen werden kann. Ritter, welcher im Jahre 1803 eine sekundäre Batterie konstruierte, benutzte Platinelektroden. Gaston Planté konstruierte im Jahre 1860 ein sekundäres Element, welches aus zwei Bleiplatten besteht, die (ohne sich zu berühren) als Elektroden aufgerollt sind und in verdünnte Schwefelsäure tauchen (Fig. 155); das Blei überzieht sich an der Anode bei wiederholten Ladungen in alternierenden Richtungen mit einer halb porösen Schicht von braunem Bleisuperoxyd, und an der Kathode-Platte geht es in einen schwammigen, metallischen Zustand über, eine grosse Oberfläche darbietend und die Gase gut festhaltend. Wenn eine solche Batterie von *Akkumulatoren* geladen wird, indem man dieselbe mit einer dynamo-elektrischen Maschine oder einem andern kräftigen Stromerzeuger verbindet, so speichert sich an der Anode der Sauerstoff auf, während die Kathode durch den frei gewordenen Wasserstoff desoxydiert. Die Platten können mehrere Tage lang in diesem Zustande ver-

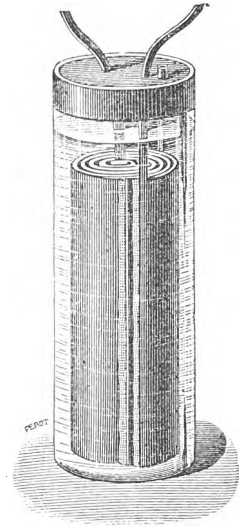

Fig. 155.

Digitized by Google

harren und liefern so lange einen Strom, bis die beiden Bleioberflächen auf einen chemisch inaktiven Zustand gebracht worden sind. Die elektromotorische Kraft solcher Elemente erreicht unter Umständen die Höhe von 2,10 bis 2,25 Volt. Planté hat in sinnreicher Weise Batterieen solcher Elemente aufgestellt, so dass dieselben bei Parallel-Schaltung geladen und hinter einander geschaltet entladen werden können; sie geben dabei (für kurze Zeit) Stöme von ausserordentlicher Stärke. Im Jahre 1881 verbesserte Faure den Planté'schen Akkumulator, indem er die beiden Bleiplatten von vornherein mit einer Schicht Mennige bedeckte. Geht ein Strom durch das Element, um dasselbe zu laden, so wird die Mennige an der Anode mit Sauerstoff beladen und an der Kathode zuerst auf eine niedere Oxydationsstufe gebracht und dann in den schwammigen metallischen Zustand übergeführt. Auf diese Weise wird für eine bedeutendere Dicke des arbeitenden Körpers gesorgt und dieser kann viel schneller angefertigt werden, als es bei den Planté'schen Elementen der Fall ist. Zum Zweck elektrischer Beleuchtung werden die Faure'schen Elemente aus dünnen Platten in der Art der Fig. 156

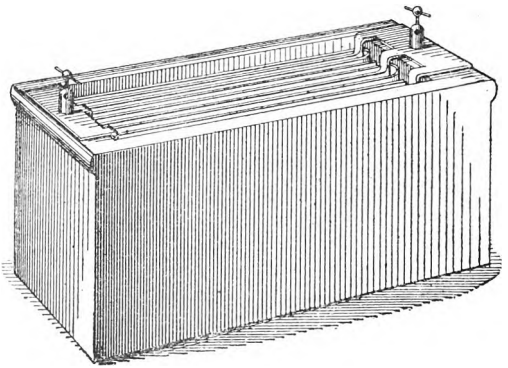

Fig. 156.

angefertigt. Bei den Akkumulatoren von Sellon und Volckmar wird die Mennige in Zwischenräume der Bleiplatten gepackt. Ein sekundäres Element gleicht einer Leydener Flasche in sofern, als es geladen und entladen werden kann. Aehnlich ist es auch mit der Zeit, in welcher es absteht. Die Restladungen der Leydener Flaschen kommen, obschon gering an Menge und vorübergehend bei ihrer Ausladung, dennoch den Polarisationsladungen der Voltameter vollkommen gleich.

416. Die Grove'sche Gas-Batterie. W. Grove konstruierte ein Element, bei welchem die gewöhnlichen Zink- und Kupferplatten durch Platinelektroden ersetzt sind, welche mit Wasserstoff-, resp. Sauerstoffgas in Be-

Digitized by Google

rührung stehen. Jedes dieser Gase wird an dem Platin zum Teil festgehalten, und dieses verhält sich unter diesen Umständen wie zwei verschiedene Metalle. Fig. 157 zeigt eine Art der Grove'schen Gas-Batterie, wo die Röhren O und H die + und — Elektrode enthalten, welche von Sauerstoff, resp. Wasserstoff umgeben sind.

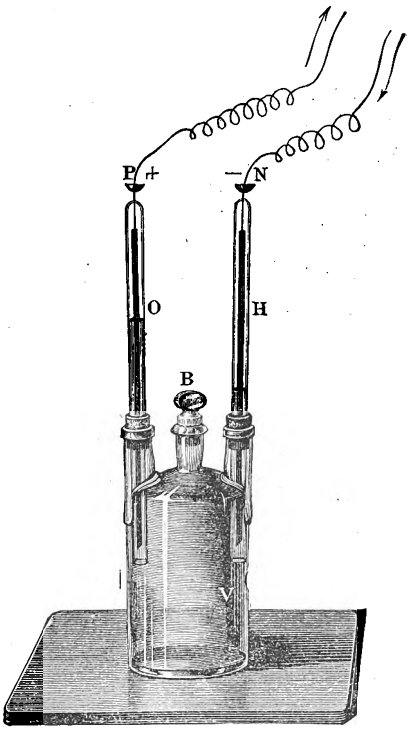

Fig. 157.

417. Allgemeine Gesetze über elektrolytische Vorgänge. Neben Faraday's quantitativen Gesetzen, welche in Art. 211 angegeben sind, sind noch folgende von Wichtigkeit:

a) Jeder Elektrolyt wird in zwei Teile zersetzt, in ein Anion und ein Kation, welche selbst wieder einfach oder zusammengesetzt sein können. Für den Fall einfacher binärer Verbindungen, wie z. B. Kochsalz, NaCl, sind die Jonen einfache Elemente. In andern Fällen werden die Produkte oft durch sekundäre Wirkungen kompliziert. Es ist sogar möglich, eine Legierung zweier Metalle — z. B. Messing — aus einem Gemenge von Zink- und Kupfer-Cyanit auszuscheiden.

b) Bei binären Verbindungen und den meisten metallischen Lösungen wird das Metall durch den Strom da abgesetzt, wo derselbe das Element verlässt, an der Kathode.

c) Wässrige Salzlösungen der Alkalien und alkalischen Erden setzen kein Metall ab, sondern entwickeln Wasserstoff in Folge einer sekundären Wirkung des Metalls auf das Wasser.

Digitized by Google

Aus *starken* Lösungen von Aetzkali und Soda vermochte Davy metallisches Kalium und Natrium herzustellen, welche vorher unbekannt waren. Werden Quecksilberelektroden angewendet, so erhält man ein Amalgam jener beiden Metalle an der Kathode. Das sogenannte Ammonium-Amalgam erhält man, wenn man eine warme, starke Lösung von Salmiak zwischen Quecksilberelektroden elektrolysiert.

d) Nach ihrem elektrolytischen Verhalten lassen sich die Körper in eine solche Reihe bringen, dass jeder Körper der Tabelle sich als Kation (oder als »elektropositiv«) erweist, wenn er aus seiner Verbindung mit einem andern Körper der Tabelle elektrolysiert wird. In einer solchen Reihe stehen die oxydierbaren Metalle, wie Kalium, Natrium, Zink etc. obenan; hierauf kommen die weniger oxydierbaren oder »elektronegativen« Metalle; dann Kohle, Sauerstoff, Phosphor, Jod, Chlor, Schwefel und zuletzt Ozon.

e) Aus einer Lösung von mehreren metallischen Salzen scheidet das am wenigsten elektropositive zuerst aus, falls der Strom nicht sehr stark ist.

f) Die frei gewordenen Jonen erscheinen nur an den Elektroden.

g) Für jeden Elektrolyt ist ein *Minimum an elektromotorischer Kraft* erforderlich, wenn eine vollständige Elektrolyse erreicht werden soll. (Vergl. Art. 413).

h) Hat der Strom eine geringere elektromotorische Kraft als das erforderliche Minimum, so kann die Elektrolyse beginnen und anfangs ein schwacher Strom fliessen, aber es werden keine Jonen frei, indem der Strom vollständig gehemmt wird, sobald die entgegengesetzte elektromotorische Kraft der Polarisation gleich der des elektrolysierenden Stromes geworden ist.

i) Es tritt keine entgegengesetzte elektromotorische Kraft der Polarisation auf, wenn die Elektrolyse von einer Anode desselben Metalles bewerkstelligt wird, welches an der Kathode abgesetzt wird. Das schwächste Element genügt, um Kupfer

Digitized by Google

aus Kupfervitriol auszuscheiden, wenn die Anode eine Kupferplatte ist.

j) Sind die Jonen Gase, so ist der Druck von Einfluss. Bei einem Drucke von 300 Atmosphären wird angesäuertes Wasser nicht elektrolysiert und verhält sich wie ein Isolator.

k) Die chemische Arbeit, welche von einem Strome in einem elektrolytischen Becher verrichtet wird, ist dem Minimum der elektromotorischen Kraft der Polarisation proportional.

l) Obgleich die elektromotorische Kraft der Polarisation dieses Minimum überschreiten kann, so tritt doch die Arbeit, welche der Strom beim Ueberwinden dieses Ueberschusses an elektromotorischer Kraft verrichtet, nicht als chemische Arbeit auf, denn kein Jon wird mehr frei; dagegen erscheint die Arbeit als eine neu hinzutretende Wärmemenge (oder »lokale Wärme«), welche in dem elektrolytischen Becher entwickelt wird.

m) das Ohm'sche Gesetz gilt für elektrolytische Leitung ebensogut wie für metallische Konduktoren.

n) Unter den sekundären Wirkungen, welche hierbei zu tage treten können, sind folgende die wichtigsten: — 1) Die Jonen können sich selbst zersetzen; wie SO_4 in $SO_3 + O$. 2) Die Jonen können auf die Elektroden eine Gegenwirkung ausüben; wird z. B. angesäuertes Wasser zwischen Zinkelektroden elektrolysiert, so wird kein Sauerstoff frei, infolge der Verwandtschaft des Zinks zum Sauerstoff. 3) Die Jonen können in einem anormalen Zustande frei werden. So wird z. B. Sauerstoff häufig in seinem aktiven Zustande als Ozon frei, besonders wenn übermangansaure Salze elektrolysiert werden. Der »naszierende« Wasserstoff, welcher bei der Elektrolyse von verdünnter Säure frei wird, hat besonders aktive chemische Eigenschaften. In gleicher Weise werden auch bisweilen die Metalle in anormalem Zustande ausgeschieden: Kupfer als schwarzer, staubiger Ueberzug; Antimon als rundliche, graue Körperchen (aus einer Lösung von Dreifach-Chlorür), welche eine eigentümliche Geneigtheit zum Explodieren haben etc.

Digitized by Google

418. Die Hypothesen von Grotthuss und Clausius. Eine vollständige Theorie der Elektrolyse muss zweierlei erklären: 1) Die Bewegung der Elektrizität und 2) die Bewegung der Materie durch die Flüssigkeit des Bechers hindurch. Der letztere Punkt hat am meisten die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt, da die »Wanderung der Jonen« (d. h. ihre Bewegung durch die Flüssigkeit) in zwei entgegengesetzten Richtungen und ihr Auftreten an den Elektroden allein auffallende Thatsachen sind.

Die von Grotthuss im Jahre 1805 aufgestellte Hypothese kann, wenn sie mit den neuern Ausdrücken in Einklang gebracht wird, diese Thatsachen ziemlich ausreichend erklären. Grotthuss nimmt an, dass, wenn zwei Metallplatten von ungleichem Potential in einen Becher gestellt werden, die ersté in der Flüssigkeit erzeugte Wirkung die ist, dass die Moleküle der Flüssigkeit sich in unendlich vielen Ketten so anordnen, dass die das Molekül zusammensetzenden Atome nach einer bestimmten Richtung zeigen; indem das elektropositive Atom von der Kathode und das benachbarte elektronegative Atom von der Anode angezogen wird. (Dies setzt voraus, dass die das Mole-

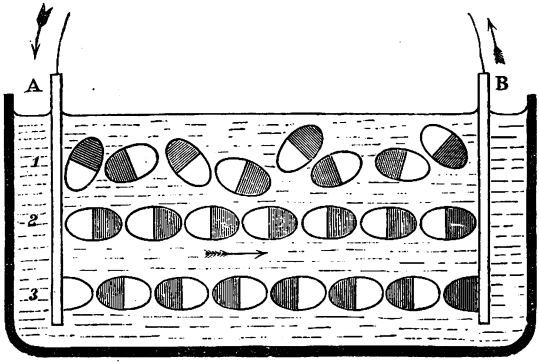

Fig. 158

kül zusammensetzenden Atome ihre individuellen elektrischen Eigenschaften beibehalten). Die Zeichnung in Fig. 158 zeigt

Digitized by Google

für den Fall von Chlorwasserstoff eine Reihe von Molekülen 1, wo dieselben ganz unregelmässig liegen, und dann eine Reihe 2, wo dieselben so gruppiert sind, wie oben angegeben. Die nach der Annahme von Grotthuss stattfindende Wirkung besteht dann darin, dass längs der ganzen Reihe die einzelnen Atome sich von ihren zugehörigen Atomen lostrennen und sich mit andern verbinden, indem jedes Wasserstoffatom sich mit dem Chloratom des benachbarten Moleküls vereinigt, und ein positives halbes Molekül Wasserstoff an der Kathode, ein negatives halbes Molekül Chlor an der Anode frei wird. Hierdurch würden die Moleküle wie in der Reihe 3 gruppiert; und wenn sich der Vorgang wiederholte, so würde also eine doppelte Wanderung erfolgen, der Wasserstoffatome in der einen Richtung und der Chloratome in der andern, und zwar so, dass die frei gewordenen Atome nur an den Elektroden erschienen, und dass jedes auf diese Weise frei gewordene Atom eine bestimmte kleine elektrische Ladung an der Elektrode absetzte, wo es frei wurde [1]).

Clausius versuchte die Grotthuss'schen Ideen mit der neuern kinetischen Theorie über die Konstitution der Flüssigkeiten in Einklang zu setzen. Danach müssen wir annehmen, dass im gewöhnlichen Zustande einer Flüssigkeit die Moleküle sich in beständiger Bewegung befinden, indem sie an einander vorbeigleiten, und dass die Atome der Moleküle ebenfalls in Bewegung sind, sich fortwährend von einander losreissen und sich zu ähnlichen Gruppen wieder vereinigen, wobei ihre Bewegungen in allen möglichen Richtungen durch die Flüssigkeit vor sich gehen. Unter dem Einflusse einer elektromotorischen Kraft wird jedoch

1) G. J. Stoney hat in neuerer Zeit aus der Grösse der Atome (wie dieselbe von Loschmidt und W. Thomson bestimmt wurde) berechnet, dass für jede chemische Trennung eine Ladung von 10^{-20} Coulomb fortgeführt wird. Diese Grösse würde also die natürliche Atom-Ladung oder Einheit sein. Um ein Atom Wasserstoff aus einer Wasserstoffverbindung auszuscheiden, muss diese Elektrizitätsmenge hindurchgeschickt werden. Ein Atom Zink, oder irgend ein anderes zweiwertiges Metall aus seiner Verbindung auszuscheiden, erfordert den Durchgang einer doppelten Elektrizitätsmenge.

Digitized by Google

die *Richtung* dieser Bewegung beschränkt, so dass ein Atom, welches sich im Verlaufe der gewöhnlichen Bewegungen von einer Gruppe trennt, das Bestreben hat, sich nach der Kathode oder nach der Anode zu bewegen; und falls die in Betracht kommende elektromotorische Kraft stark genug ist, um eine Wiedervereinigung zu verhindern, so werden diese Atome dauernd getrennt und sammeln sich um die Elektroden herum an. Diese Theorie hat den Vorzug, dass sie die leicht zu beobachtende Thatsache erklärt, dass eine elektromotorische Kraft, welche kleiner als das zur vollständigen Elektrolyse erforderliche Minimum ist, durch einen Elektrolyten für eine begrenzte Zeit einen schwachen Strom senden kann, bis nämlich die entgegengesetzte elektromotorische Kraft einen ebenso grossen Wert erreicht hat. Helmholtz nannte diese Erscheinung der teilweisen Elektrolyse die *elektrolytische Konvektion;* er nimmt an, dass sie durch die nicht verbundenen Atome bewirkt wird, welche schon vorher in der Flüssigkeit waren. Diese Annahme ist thatsächlich schon in der kinetischen Theorie von Clausius enthalten.

419. Elektrometallurgie. Die Anwendungen der Elektrochemie auf die Gewerbe sind dreierlei Art: 1) Gewinnung der Metalle aus Lösungen ihrer Erze; ein Prozess, welcher für gewöhnlich zu grosse Kosten verursacht, der jedoch von grossem Nutzen bei der genauen Münzprobe gewisser Erze ist, wie z. B. des Kupfers. 2) Vervielfältigung von Bildern, Gipsfiguren und Metallsachen durch Ablagerung des Metalls an der Kathode. 3) Ueberziehen von Gegenständen aus ordinärem Metall mit einer dünnen Schicht eines andern Metalls, wie Gold, Silber oder Nickel. Alle diese Anwendungen fasst man unter dem allgemeinen Namen *Elektrometallurgie* zusammen.

420. Elektrotypographie. Im Jahre 1836 machte De la Rue die Beobachtung, dass das Kupfer, welches aus der Lösung ausgeschieden und auf der als Pol dienenden Kupferplatte abgesetzt wird, ein genauer Abdruck der Platte ist, bis auf die Schrammen derselben. Im Jahre 1839 gaben Jacobi in

Digitized by Google

St. Petersburg, Spencer in Liverpool und Jordan in London, gestützt auf diese Thatsache und unabhängig von einander eine Methode an, wie man vermittelst der Elektrolyse des Kupfers Abdrücke (im umgekehrten Relief) von Münzen, Stereotypplatten und Schmuckgegenständen erhalten kann. Eine weitere von Murray herrührende Verbesserung war der Gebrauch von Gips- oder Wachsformen, welche mit einer Graphitschicht überzogen sind, um eine leitende Oberfläche herzustellen, auf welcher der Niederschlag vor sich gehen kann. Jacobi nannte diesen Prozess *Galvanoplastik*, ein Ausdruck, den man jetzt allgemein durch den Ausdruck **Elektrotypographie** ersetzt hat.

Elektrotypen des Kupfers lassen sich leicht anfertigen, indem man eine geeignete Form in einem Becher aufstellt, welcher eine gesättigte Lösung von Kupfervitriol enthält und dann einen Strom einer Batterie durch das Element schickt; die Form bildet die Kathode, und eine Kupferplatte die Anode, welche sich allmählich in der Flüssigkeit auflöst und zwar in genau demselben Verhältnis, wie die Ablagerung an der Kathode stattfindet. Dieser Gebrauch einer besonderen Batterie ist bequemer, als wenn man die Elektrotypen in einem Elemente einer Daniell'schen Batterie hervorbringt. Diese Methode kommt heutzutage vielfach in Anwendung, um getriebene Ornamente und andere Kunstwerke nachzubilden und Holzschnitte zu vervielfältigen. Fast alle Illustrationen dieses Buches z. B. sind von Elektrotypen abgedruckt, und nicht von den ursprünglichen Holzblöcken, welche nicht lange genug vorhalten würden.

421. Galvanische Vergoldung und Versilberung. Im Jahre 1801 machte Wollaston die Beobachtung, dass ein Stück Silber, welches mit einem stärker positiven Metall verbunden wird, sich mit einer Kupferschicht überzieht, wenn man dasselbe in eine Kupferlösung stellt; und im Jahre 1805 vergoldete Brugnatelli zwei silberne Medaillen, indem er sie als Kathoden eines mit einer Goldlösung gefüllten elektrolytischen Bechers nahm. Darauf führte Elkington die galvanische Vergoldung und Versilberung um das Jahr 1840 in das Gewerbe ein. Bei diesen

Digitized by Google

Prozessen wird ein schlechteres Metall, wie z. B. Argentan (eine Legierung von Zink, Kupfer und Nickel) mit einer dünnen Schicht von Gold oder Silber überzogen, indem man im erstern Falle eine Lösung von Cyangold und Kalium, im zweiten Falle eine solche von Cyansilber und Kalium verwendet.

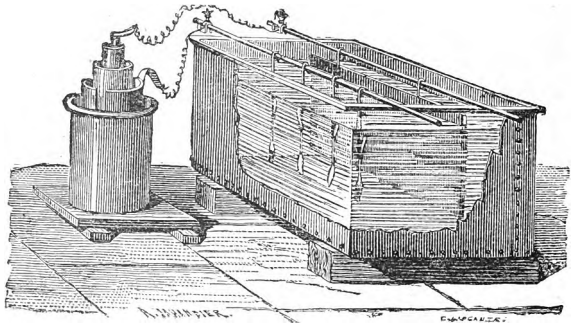

Fig. 159.

Fig. 159 zeigt eine Batterie und ein Versilberungsgefäss, welches die Silberlösung enthält. An der Anode befindet sich eine Platte metallischen Silbers, welches sich in der Flüssigkeit auflöst. An der Kathode sind Löffel, Gabeln oder andere Gegenstände aufgehängt, welche mit einem Silberüberzuge versehen werden sollen. Wird der Lösung etwas Schwefelkohlenstoff zugesetzt, so nimmt das sich niederschlagende Metall eine glänzende Oberfläche an. Ist der Strom zu stark und der Niederschlag in Folge dessen zu schnell, so wird das abgesetzte Metall graulich und krystallinisch.

Beim Versilbern oder Vergolden eiserner Gegenstände überzieht man dieselben gewöhnlich erst mit einer dünnen Kupferschicht. Beim Vergolden unedler Metalle, wie z. B. des Zinns, werden dieselben ebenfalls erst mit Kupfer belegt. Das Vergolden der Innenseite von Krügen und Tassen geschieht in der Weise, dass dieselben mit der Goldlösung angefüllt werden und dann eine Anode von Gold hineingehängt wird, während

Digitized by Google

das Gefäss selbst mit dem — Pole der Batterie verbunden wird.

An Stelle einer Batterie kommen in neuerer Zeit häufig thermo-elektrische Generatoren (Art. 384) oder dynamo-elektrische Generatoren (Art. 408) zur Anwendung.

422. Metallochromie. Im Jahre 1826 machte Nobili die Entdeckung, dass sich *auf der Anode* eine Schicht von Bleisuperoxyd bildet, wenn eine Bleilösung elektrolysiert wird. Ist die Anode eine Metallplatte, z. B. eine polierte Stahlplatte, welche sich in horizontaler Lage in der Flüssigkeit unter einem als Kathode dienenden Platindrahte befindet, so findet die Ablagerung in symmetrischen Ringen von verschiedener Dicke statt, so dass die Ringe am Zentrum am dicksten sind. Diese Ringe, welche unter dem Namen der **Nobili'schen Ringe** bekannt sind, zeigen alle Farben des Regenbogens, welche von der Interferenz der in der Schicht zusammentreffenden Lichtwellen herrühren; dadurch werden Strahlen verschiedener Wellenlänge und verschiedener Farbe in verschiedenen Abständen vom Mittelpunkte ausgelöscht. Die Farben entsprechen in der That den Newton'schen Farbenringen dünner Platten, jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Nach Wagner werden diese chromatischen Wirkungen, welche durch die Elektrolyse einer Bleilösung in Aetznatron erzeugt werden, in Nürnberg zur Färbung metallischer Spielwaaren benutzt. Der Verfasser dieser Vorlesungen hat die Beobachtung gemacht, dass die Nobili'schen Ringe nicht mehr kreisförmig sind, wenn dieselben in einem magnetischen Felde erzeugt werden, indem die niederschlagenden Ströme eine seitliche Ablenkung erfahren, wie sich solche aus der beobachteten Einwirkung von Magneten auf Stromleiter vorher bestimmen liesse.

422 a. Elektrochemische Kraft der Metalle. Die nachstehende Tabelle gibt die elektromotorische Kraft der verschiedenen Metalle an, wie dieselben nach der Methode des Art. 414 aus ihren elektrochemischen Aequivalenten (Art. 212) und aus der Wärme berechnet worden ist, welche entwickelt wird, wenn sich eine solche Menge des Metalls mit Sauerstoff verbindet, welche elektrochemisch einem Gramm Wasserstoff äquivalent ist. Die elektromotorischen Kräfte (in Volt), welche in Bezug auf verdünnte Schwefelsäure beobachtet worden sind, sind des Vergleichs halber mit angeführt.

Digitized by Google

Körper	Verbrennungswärme.	Berechnete E.M.K. bezogen auf Sauerstoff	Berechnete E.M.K. bezogen auf Zink	Beobachtete E.M.K.
Kalium	69,800	3,01	+ 1,18	+ 1,13
Natrium	67,800	2,91	+ 1,09	—
Zink	42,700	1,93	0	0
Eisen	34,120	1,55	— 0,28	—
Wasserstoff	34,000	1,47	— 0,36	—
Blei	25,100	1,12	— 0,71	— 0,54
Kupfer	18,760	0,80	— 1,08	— 1,047
Silber	9,000	0,39	— 1,44	—
Platin	7,500	0,33	— 1,50	— 1,53
Kohle	2,000	0,09	— 1.74	—
Sauerstoff	0	0	— 1,83	— 1,85
Salpetersäure . . .	— 6,000	— 0,26	— 2,09	— 1,94
Braunstein	— 6,500	— 0,29	— 2,12	— 2,23
Bleisuperoxyd . . .	— 12,150	— 0,52	— 2,35	— 2,52
Ozon	— 14,800	— 0,63	— 2,46	— 2,64

Die Aufeinanderfolge, in welcher diese Metalle aufgezählt sind, ist in der That nichts anderes, als die Reihenfolge der Oxydierbarkeit der Metalle (in der Umgebung von verdünnter Schwefelsäure); denn dasjenige Metall strebt am meisten zu oxydieren, welches beim Oxydieren die grösste Energie entwickeln kann. Die Tabelle gibt auch die Reihenfolge, in welcher die Metalle einander zu ersetzen befähigt sind (in einer Lösung von Schwefelsäure). In dieser Reihe sind ferner die zuletzt stehenden Metalle diejenigen, welche von einem elektrischen Strome aus 2 oder mehrere derselben enthaltenden Lösungen ausgeschieden werden; denn dasjenige Metall wird zuerst ausgeschieden, welches den geringsten Aufwand an Energie erfordert, um von den Atomen getrennt zu werden, mit denen es verbunden war.

Digitized by Google

KAPITEL XII.

TELEGRAPHEN UND TELEPHONE.

XXXIX. VORLESUNG: *Elektrische Telegraphen.*

423. Der elektrische Telegraph. Es ist schwer zu sagen, wer der eigentliche Erfinder des Telegraphs gewesen ist. Lesage (Genf, 1774), Lomond (Paris 1787) und F. Ronalds (London 1816) erfanden Systeme, mittelst deren man Signale durch Drähte hindurchschicken konnte, indem man an dem einen Ende die Divergenz zweier Markkugeln beobachtete, wenn in das andere Ende eine elektrische Ladung geführt wurde. Cavallo (London 1795) schickte Funken von Leydener Flaschen durch Drähte »gemäss einem vorher festgesetzten Plane«. Sömmering (München 1808) konstruierte einen Telegraphen, bei dem die Signale durch Zersetzung des Wassers in Voltametern gegeben wurden; ferner wurde die Uebertragung von Signalen durch chemische Zersetzung von Körpern noch von Coxe, R. Smith, Bain und andern angestrebt. Ampère (Paris 1821) machte den Vorschlag, ein an einer entfernten Stelle des Stromleiters befindliches Galvanometer bei der Fortpflanzung von Signalen zu benutzen. Schilling und Weber (Göttingen 1833) benutzten die Ablenkungen einer Galvanometernadel, welche sich nach links und nach rechts drehte, um einen alphabetischen Zeichenkodex längs eines einfachen Stromleiters zu telegraphieren. Cooke und Wheatstone (London 1837) brachten die erste Form ihres *Nadel*-Telegraphen in praktischen Gebrauch. Henry (New-York 1831) benutzte die anziehende Kraft eines Elektromagnets, um Signale zu geben, indem die Bewegungen der Armatur hörbare Töne erzeugten, welche bestimmte Buchstaben repräsentierten. Morse (New-York 1837) erfand einen Telegraphen, bei welchem mittelst der Anziehung einer Armatur durch einen Elektromagnet auf einem beweglichen Papierstreifen ein Punkt oder ein Strich markiert wird. Steinheil (München 1837) machte die Entdeckung, dass an Stelle des zweiten, zurückführenden Drahtes die *Erde* benutzt werden kann, indem an beiden Enden durch in das Erdreich

Digitized by Google

gesenkte Platten (Fig. 160) eine Berührung mit der Erde hergestellt wird. Gintl (1853) und Stearns (New-York 1870) erfanden Methoden des *Doppelsprechens*. Stark (Wien) und Bosscha (Leyden 1855) erfanden die Methode des *Gegensprechens* und Edison (Newark, N. J. 1874) erfand die Methode des gleichzeitigen *Doppel- und Gegensprechens*. Für den Eildienst erfand Wheatstone seinen automatischen Uebertrager, bei dem die Buchstaben darstellenden Zeichen zuerst durch eine Maschinerie auf Papierstreifen gedruckt werden; diese bewegen sich dann mit grosser Geschwindigkeit durch den übertragenden Apparat, welcher sie mit bedeutend grösserer Geschwindigkeit abtelegraphiert, als wenn die einzelnen Signale mit der Hand telegraphiert werden. Hughes erfand einen Typendrucktelegraph. Wheatstone erfand einen ABC-Telegraph, bei dem die Signale durch einen sich über einem Zifferblatt bewegenden Zeiger buchstabiert werden. Für den Kabeldienst erfand W. Thomson sein Spiegelgalvanometer und seinen empfindlichen Heber-Aufzeichner. In diesen Vorlesungen können nur ein bis zwei der einfacheren und gebräuchlicheren Arten der telegraphischen Apparate beschrieben werden. Wer sich darüber weiter informieren will, kann die ausgezeichneten Lehrbücher über Telegraphie nachsehen, welche Preece und Sivewright, sowie Culley herausgegeben haben [1]).

424. Der Nadelapparat. Der Nadelapparat (Fig. 160) besteht im Wesentlichen aus einem vertikalen Galvanometer, bei welchem eine leicht beweglich aufgehängte Magnetnadel zur Rechten oder Linken abgelenkt wird, wenn durch eine die Nadel umgebende Rolle in dieser oder jener Richtung ein Strom geschickt wird; die Nadel, welche vorn am Zifferblatt zu sehen ist, ist bloss ein Zeiger; die wirkliche Magnetnadel befindet sich hinter dem Zifferblatte. Durch Kombination von Bewegungen nach rechts und links wird das ganze Alphabet nach Uebereinkunft dargestellt. Um in beiden

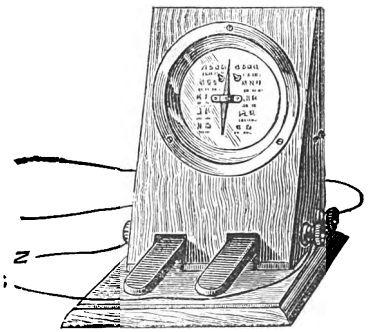

Fig. 160.

1) Anm. d. Uebers. Ausführlichere Lehrbücher in deutscher Sprache sind u. a.: Schellen, der elektromagnetische Telegraph; Weidenbach, Kompendium der elektrischen Telegraphie.

Digitized by Google

Richtungen Ströme durch den Stromleiter zu senden, wird gewöhnlich von einem »Signal-Schlüssel« Gebrauch gemacht. Der Schlüssel am einen Ende der Leitung setzt den Apparat am andern Ende in Thätigkeit; aus Zweckmässigkeitsgründen wird derselbe an dem Empfangsapparat befestigt. In Fig. 160 bilden den Schlüssel die beiden unten vorstehenden Hebel und je nachdem der rechte oder linke niedergedrückt wird, geht ein Strom in dieser oder jener Richtung durch die Drähte.

Die Wirkungsweise wird durch Fig. 161 erläutert, welche einen einzelnen Signalschlüssel darstellt. Die beiden horizontalen Hebel stehen mit der Telegraphenlinie, resp. mit dem Rückstromleiter durch die Erde in Verbindung. In der Ruhelage drücken beide gegen einen metallenen Querstreifen, welcher mit dem Zinkpole der Batterie in Verbindung steht. Unter ihnen befindet sich ein anderer Querstreifen, welcher mit dem + (Kupfer-) Pole der Batterie in Verbindung steht. Wird der Schlüssel der Telegraphenlinie herabgedrückt, so fliesst der Strom durch dieselbe hindurch und durch die Erde zurück oder in der *positiven* Richtung. Wird der Schlüssel der Erde herabgedrückt (während der Schlüssel der Telegraphenlinie den mit dem Zink in Verbindung stehenden Streifen berührt), so fliesst der Strom durch die Erde hin und durch die Telegraphendrähte zurück, oder in der *negativen* Richtung. Telegraphenbeamte sprechen gewöhnlich von positiven, resp. negativen *Strömen.*

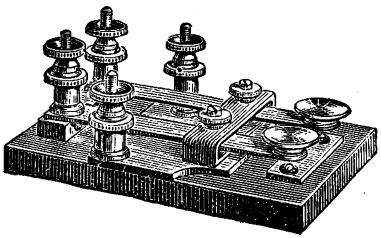

Fig. 161.

Da es erforderlich ist, dass eine Drahtleitung von beiden Seiten in Thätigkeit gesetzt werden kann, so wird auf beiden Stationen von einer Batterie Gebrauch gemacht, und die Drähte werden derart verbunden, dass der Stromleiter an dem Ende, wo ein Telegramm aufgenommen wird, offen ist. Fig. 162 zeigt einen möglichst einfachen Fall einer solchen Anordnung. An

Digitized by Google

dem einen Ende befindet sich eine Batterie *zc*, deren einer Pol zur Erde führt, während der andere mit einem Schlüssel K in

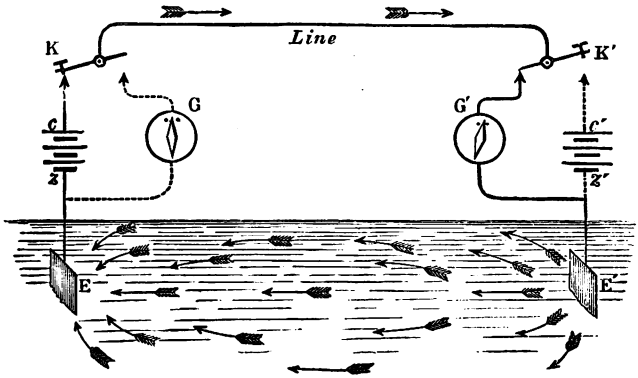

Fig. 162.

Verbindung steht. Dieser Schlüssel ist so eingerichtet (vergl. Fig. 164), dass beim Niederdrücken ein Strom durch die Telegraphendrähte fliesst, während der Kontakt mit dem Aufnahmeapparate derselben Station unterbrochen wird. Der durch die Telegraphendrähte fliessende Strom geht durch K' in einen Aufnahmeapparat (Empfänger) G' auf der andern Station, wo derselbe ein Signal gibt, und kehrt dann durch die Erde zu der Batterie zurück, von welcher er ausging. Eine ähnliche Batterie und ein ähnlicher Schlüssel auf der entfernten Station genügen, um in der entgegengesetzten Richtung Signale nach G zu befördern, wenn K nicht herabgedrückt ist. In der Figur erscheint G als ein einfaches Galvanometer; doch würde die Anordnung vollständig für den Morse'schen Apparat passen, welcher nur das Entsenden lang und kurz dauernder Ströme auf beiden Stationen erfordert, ohne die Richtung zu ändern.

425. Der Morse-Apparat. Der gebräuchlichste Apparat ist heutzutage der von Morse. Der Apparat besteht im Wesentlichen aus einem Elektromagnet, welcher, sobald ein Strom durch seine Rollen geht, eine Armatur für kürzere oder längere Zeit niederzieht. Derselbe kann entweder als »*Schall-*

Digitized by Google

apparat« eingerichtet werden, in welchem Falle der das Telegramm empfangende Beamte auf die Schläge hört und sich notiert, ob die Intervalle zwischen denselben lang oder kurz sind; oder es kann derselbe als »*Druckapparat*« eingerichtet werden, welcher Punkte und Striche auf einem Papierstreifen verzeichnet, der durch ein Uhrwerk vor dem Apparate bewegt wird. In der allerneuesten Gestalt ist jedoch der Morse'sche Apparat als »*Tintenschreiber*« angeordnet, indem die Anziehung der Armatur nach abwärts eine kleine Tintenfeder emporzieht und dieselbe gegen einen Papierstreifen drückt. Ist der Strom nur kurze Zeit geschlossen, so wird ein blosser Punkt verzeichnet. Fliesst der Strom längere Zeit, so bewegt sich der Papierstreifen weiter, und die Tintenfeder markiert einen Strich. Das Morse'sche Alphabet ist in folgender Weise aus Punkten und Strichen zusammengesetzt:

A . —	K — . —	U . . —
B — . . .	L . — . .	V . . . —
C — . — .	M — —	W . — —
D — . .	N — .	X — . . —
E .	O — — —	Y — . — —
F . . — .	P . — — .	Z — — . .
G — — .	Q — — . —	Punkt . . . . .
H	R . — .	Wiederholungszeichen . . — — . .
I . .	S . . .	Bindestrich — . . . . —
J . — — —	T —	Apostroph . — — — — .

426. Relais. Beim Telegraphieren auf weite Entfernungen oder für den Fall, wo sich in dem Stromleiter eine grössere Anzahl von Apparaten befindet, sind häufig die Ströme nicht stark genug, um den Druckapparat direkt in Thätigkeit zu setzen. In diesem Falle wird ein Relais oder Wiederholer eingeschaltet. Dieser Apparat besteht aus einem Elektromagnet, um welchen der Telegraphenstrom fliesst. Wird die leicht bewegliche Armatur desselben angezogen, so wird dadurch der Kontakt für einen lokalen Stromkreis hergestellt, in welchem eine lokale Batterie und der Morse'sche Empfangsapparat ein-

Digitized by Google

geschaltet sind. Das Relais beruht also auf dem Prinzipe, dass ein Strom, welcher zu schwach ist, um die Arbeit selbst zu verrichten, einen starken lokalen Strom schliesst, welcher für ihn diese Arbeit verrichtet.

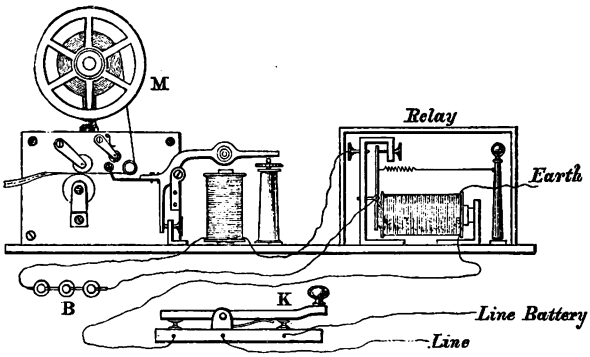

Fig. 163.

In Fig. 163 sind ein Relais und ein Morse'scher Apparat M abgebildet (ein »Druckapparat«), welcher mit einer lokalen Batterie B durch einen Stromleiter verbunden ist. Jedes Mal, wo ein Strom in der Leitung die Zunge des Relais bewegt, wird der lokale Strom geschlossen und der Morse'sche Apparat verzeichnet auf dem Papierstreifen einen Punkt oder einen Strich. Der Schlüssel K ist in Fig. 164 im vergrösserten Mass-

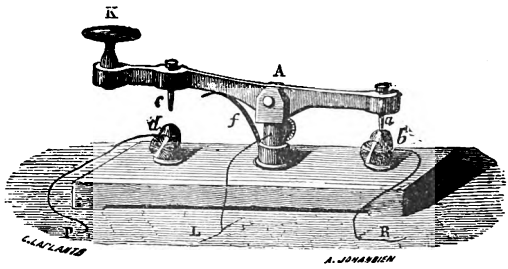

Fig. 164.

stabe abgebildet. Der Telegraphendraht ist mit dem mittleren Zapfen A verbunden. Eine Feder *f* hält das vordere Ende des

Digitized by Google

Schlüssels hoch, wenn derselbe nicht gebraucht wird, so dass der Liniendraht durch das hintere Ende des Schlüssels mit dem Relais oder dem Aufnahmeapparate in Verbindung steht. Beim Niederdrücken des Schlüssels wird diese Verbindung aufgehoben, und indem man den Liniendraht mit der Hauptbatterie in Verbindung bringt, geht ein Strom durch die Leitung hindurch.

427. **Störungen in Telegraphenlinien.** Solche können durch verschiedene Ursachen veranlasst werden: entweder durch das Reissen der Drähte oder durch das Zertrümmern der Isolatoren, wodurch der Strom durch die Erde einen kürzern Rückweg nimmt und die Endstation gar nicht erreicht oder, wie bei oberirdischen Leitungen, durch gegenseitige Berührung zweier Leitungsdrähte. Die Telegrapheningenieure kennen verschiedene Methoden, um das Dasein und die Lage schadhafter Stellen zu entdecken; diese Methoden basieren auf genauen Messungen des Widerstandes oder der Kapazität. Reisst z. B. ein Telegraphenkabel mitten im Ozean durch, so lässt sich der Abstand zwischen dem am Ufer befindlichen Ende und der Bruchstelle dadurch berechnen, dass man den bekannten Widerstand, welchen das Kabel pro Meile bietet, mit dem Widerstande der Kabellänge bis zur Bruchstelle vergleicht und letztern durch erstern dividiert.

428. **Gegensprechen.** Die telegraphischen Apparate lassen sich auf zwei verschiedene Weisen derart anordnen, dass durch einen Draht gleichzeitig zwei Depeschen gesandt werden können, von jedem Ende eine. Die erste Methode, als die *Differential-Methode* bekannt, bedingt die Anwendung von Apparaten, welche mit Differential-Rollen umwunden sind, und ist auf besondere Fälle anwendbar. Die zweite Methode des Gegensprechens, als die *Wheatstone'sche Brückenmethode* bekannt, findet eine weit ausgedehntere Anwendung. Fig. 165 veranschaulicht die Hauptsache dieses Prinzipes. Die erste Bedingung für das Gegensprechen ist die, dass der Apparat jeder Station nur durch Signale der andern Station in Thätigkeit kommt, so

Digitized by Google

dass ein Beamter in R im Stande ist, nach dem entfernten Apparate M' zu telegraphieren, ohne dass sein eigener Apparat M

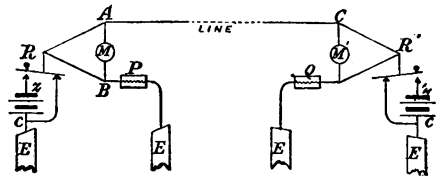

Fig. 165.

davon berührt wird, während sich trotzdem M im Stromleiter befindet und durch den Beamten in R' Signale aufnehmen kann. Zu dem Zwecke ist der Stromleiter bei R in zwei Zweige geteilt, von denen der eine über A zur Linie, der andere über B durch einen gewissen Widerstand zur Erde führt. Ist nun das Verhältnis der Widerstände in den Zweigen RA und RB gleich dem Verhältnis des Widerstandes der Linie und dem von P, so geht nach dem Prinzipe der Wheatstone'schen Brücke kein Strom durch M. Deshalb zeigt M die von R ausgehenden Ströme nicht an, wohl aber M', denn der Strom teilt sich bei seiner Ankunft in C in zwei Teile, von denen der eine über R' zur Erde, der andere durch M' fliesst und hier ein Signal hervorruft. Wenn unterdessen der Beamte in R' seinen Schlüssel herabdrückt und einen gleichen Strom in entgegengesetzter Richtung sendet, so fliesst keine Elektrizität mehr durch die Linie; dagegen zeigt jetzt M ein Signal an, denn obgleich in der Linie kein Strom fliesst, so fliesst doch der Strom im Zweige RA durch M abwärts, als wenn derselbe von R' käme, so dass M auf Signale, welche von R' kommen, reagiert, gleichviel, ob der Beamte in R telegraphiert oder nicht.

Die Methode des **Doppelsprechens** besteht darin, dass gleichzeitig durch denselben Draht zwei Depeschen in derselben Richtung geschickt werden. Zu diesem Zwecke ist es erforderlich, solche Apparate zu verwenden, welche nur mit Strömen in einer gegebenen Richtung arbeiten. Die Methode bedingt

Digitized by Google

die Anwendung von »Relais«, bei denen die Armaturen selbst permanent magnetisiert (oder »polarisiert«) sind, und welche daher nur auf Ströme in einer Richtung reagieren.

Endlich gibt es noch eine Methode, welche das **Doppelsprechen und Gegensprechen** vereint. Bei einer und derselben Linie werden zwei Sorten von Apparaten benutzt; die eine Sorte (von einem »polarisierten« Relais getrieben) arbeitet nur dann, wenn die *Richtung* des Stromes geändert wird; die andere Sorte (von einem nicht-polarisierten Relais getrieben, welches mit Federn versehen ist, so dass es sich nur bei einem bestimmten Minimum an Kraft bewegt) arbeitet nur dann, wenn die *Stärke* des Stromes sich ändert, und ist unabhängig von der Richtung der Ströme.

429. Unterseeische Telegraphen. Der telegraphische Verkehr zwischen zwei durch einen Meeresarm oder den Ozean getrennten Ländern wird durch Kabel vermittelt, welche auf den Grund des Meeres versenkt sind, und welche aus leitenden Drähten gemacht sind, die durch eine äussere Hülle aus isolierendem Material geschützt werden. Der Konduktor ist gewöhnlich ganz reiner Kupferdraht, welcher 70—400 Pfund pro Seemeile wiegt, und in siebenfachen Strängen geflochten, um die Gefahr des Reissens zu verhüten. Fig. 166 zeigt in natürlicher Grösse Teile der Atlantischen Kabel, welche in den Jahren 1857 und 1866 gelegt wurden. Bei dem letztern Kabel, welches den gebräuchlichen Typus für lange Linien zeigt, wird der Kern zunächst durch eine starke Guttapercha-Schicht geschützt, darauf durch ein Hanfgewebe, und auf der Aussenseite noch durch eine aus zehn eisernen Drähten bestehende Scheide, von denen jeder mit Hanf umwickelt ist. Die *Uferenden* sind in noch stärkerer Weise durch äussere Drähte geschützt.

430. Geschwindigkeit des Telegraphierens durch Kabel. Depeschen, welche durch lange Kabel gehen, erleiden aus zwei Gründen eine Verzögerung:

1) Die Selbstinduktion des Stromleiters verhindert, dass der Strom sogleich seine volle Stärke erreicht; die Verzögerung

Digitized by Google

wird durch die in Art. 405 angegebenen Gleichungen von Helmholtz angegeben.

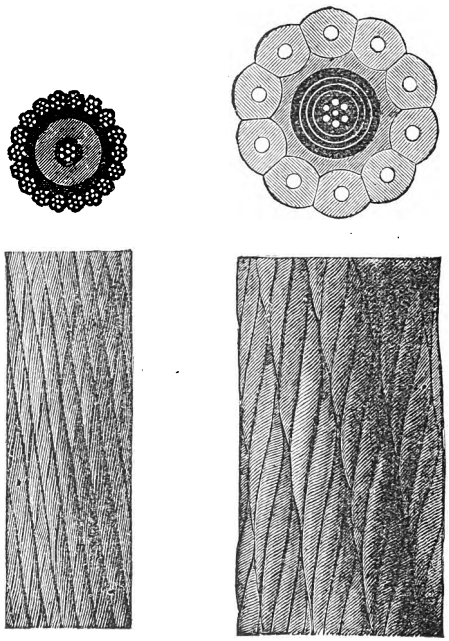

Fig. 166.

2) Wird das Kabel in seiner isolierenden Hülle ins Wasser versenkt, so wirkt dasselbe wie eine Leydener Flasche von ungeheurer Kapazität (wie in Art. 274 erklärt worden ist) und die ersten Teile des Stromes fliessen nicht durch das Kabel hindurch, sondern bleiben in demselben als elektrostatische *Ladung*. Für jedes einzelne Signal muss das Kabel wenigstens teilweise geladen und entladen werden. Wenn ein Strom durch ein Atlantisches Kabel von Irland nach New-Foundland geschickt wird, so vergehen, wie Culley beobachtet, zwei Zehntel einer Sekunde, bevor ein höchst empfindlicher Apparat auf der Empfangsstation reagiert, und drei Sekunden, ehe der Strom seine volle Stärke erreicht, indem er in einer durch das Kabel fort-

Digitized by Google

schreitenden elektrischen Welle wächst. Auch nimmt die Stromstärke allmählich ab, wenn der Stromleiter unterbrochen wird. Diese Verzögerung ist mehr eine Folge der elektrostatischen Ladung als der elektromagnetischen Selbstinduktion, da dieselbe dem *Quadrate der Kabellänge* proportional ist. Die verschiedenen in Anwendung gebrachten Mittel, um diese Verzögerung zu beseitigen, sind in Art. 275 erklärt worden.

431. Empfangsapparate für Kabel. Das *Spiegelgalvanometer* von W. Thomson (Art. 202) wurde zum Zwecke des Telegraphierens durch Kabel erfunden, indem die Bewegungen des Lichtfleckes, welcher in kurzen oder langen Abständen über die Skala gleitet, genügt, um die Punkte und Striche des Morse'schen Alphabets zu telegraphieren. Der *heberförmige Schreibapparat* von W. Thomson verzeichnet die Signale auf einem Papierstreifen in folgender kunstvollen Weise: — Die Nadel eines kräftigen und empfindlichen Galvanometers wird durch einen feinen Glasheber ersetzt, der an einem seidenen Faden aufgehängt ist, dessen eines Ende in ein Gefäss mit Tinte taucht. Die Tinte wird ohne Reibung auf einen Papierstreifen gespritzt (der durch ein Uhrwerk in senkrechter Richtung hinter dem Heber bewegt wird), indem das Spritzen auf elektrischem Wege geschieht, in der Weise, dass das Gefäss mit Tinte durch einen kontinuierlichen Elektrophor geladen wird, welcher selbst durch eine kleine elektromagnetische Maschine getrieben wird.

XL. VORLESUNG: *Elektrische Glocken, Uhren und Telephone.*

432. Elektrische Glocken. Die gewöhnliche Form der *elektrischen Glocke* ist ein Elektromagnet, welcher einen Hammer hin und her bewegt, indem er denselben abwechselnd anzieht und wieder loslässt, so dass derselbe gegen eine Glocke schlägt. Die Einrichtung des Apparates macht Fig. 167 anschaulich, wo E der Elektromagnet und H der Hammer ist. Eine aus 1 bis 2 Leclanché'schen Elementen bestehende Batterie, die an irgend einer geeigneten Stelle des Stromleiters aufgestellt ist, liefert

Digitized by Google

erforderlichen Falls den Strom. Indem man den Drücker P berührt, wird der Stromkreis geschlossen, und es geht ein Strom

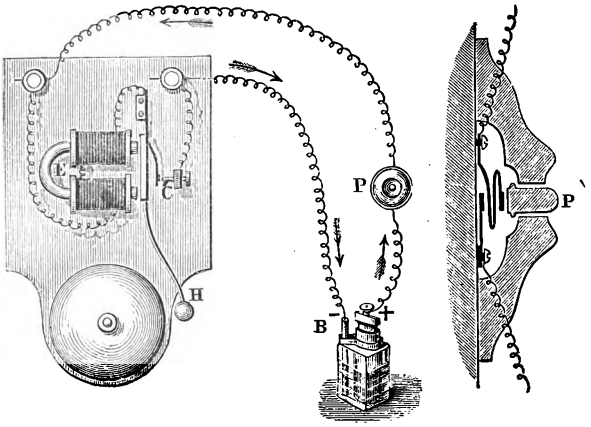

Fig. 167.

durch den Draht und die Rollen des Elektromagnets, welcher sofort ein kleines Stück weichen Eisens anzieht, das an dem in dem Hammer H endigenden Hebel befestigt ist. Der Hebel selbst ist in dem Stromleiter eingeschaltet, indem der Strom oben in denselben eintritt und denselben bei C mittelst eines Unterbrechers verlässt Dieser besteht aus einer am Ende mit Platin belegten Feder, welche gegen die Platinspitze einer Schraube drückt, von wo ein Draht zurück nach dem Zinkpole der Batterie führt. Sobald der Hebel angezogen wird, wird der Stromleiter bei C unterbrochen, da die Schraube von der Feder nicht mehr berührt wird. Folglich hört der Strom auf, und der Elektromagnet lässt die Armatur los. Hebel und Hammer fallen daher zurück, stellen die Berührung bei C wieder her, worauf der Hammer zum zweiten Male angezogen wird, und so weiter. Den Drücker P sieht man rechts in Fig. 167 von der Seite. Derselbe besteht gewöhnlich aus einem cylindrischen Knopf von Elfenbein oder Porzellan, der sich lose durch eine kreisförmige Oeffnung einer Bekleidung von Holz oder Porzellan

Digitized by Google

bewegen kann, und der beim Niederdrücken eine mit Platin belegte Feder gegen einen Metallstift presst und auf diese Weise zwischen den beiden Teilen des unterbrochenen Stromkreises die Berührung herstellt.

433. **Elektrische Uhren.** Uhren können durch elektrische Ströme entweder getrieben oder kontrolliert werden. Bain, Hipp und andere haben elektrische Uhren der ersten Art erfunden, bei denen die gewöhnliche bewegende Kraft eines Gewichtes oder einer Feder keine Anwendung findet, indem die Uhr durch ein Pendel getrieben wird, dessen »Linse« ein von beiden Seiten abwechselnd angezogener Elektromagnet ist. Die Schwierigkeit, einen vollkommen konstanten Strom zu unterhalten, war der Grund, dass solche Uhren nicht in allgemeinen Gebrauch gekommen sind.

Grössern Nutzen gewährte die Erfindung von Uhren, die auf elektrischem Wege kontrolliert und die von einer Normaluhr getrieben werden. Bei diesen ist das Normal-Chronometer derart konstruiert, dass es in periodischen Zwischenräumen einen Stromleiter schliesst, etwa einmal in jeder Minute oder in jeder halben Minute. Die hindurchgeführten Ströme setzen die Zeiger eines Systems von an verschiedenen Stellen befindlichen Zifferblättern in Bewegung, indem sie durch einen hinter jedem Zifferblatt aufgestellten Elektromagnet eine Armatur anziehen, welche mittelst eines Sperrhakens auf ein Sperrrad wirkt, wodurch dasselbe während jedes bestimmten Intervalls um einen Zahn weiter bewegt wird. Auf diese Weise drehen sich die Zeiger mit derselben Geschwindigkeit wie die einer Normaluhr.

Elektrische *Chronographen* werden zur Messung sehr kleiner Zeitintervalle benutzt. Ein an der Armatur eines Elektromagnets befestigter Stift verzeichnet eine Linie auf einem Stück Papier, das an einem durch ein Uhrwerk in Umdrehung versetzten Cylinder befestigt ist. Ein durch die Rollen des Elektromagnets gehender Strom bewegt die Armatur und erzeugt eine seitliche Ausbiegung in der so verzeichneten Linie. Zwei Ströme werden durch 2 Ausbiegungen markiert, und aus dem *räumlichen* Intervall zwischen beiden Ausbiegungen lässt sich das *zeitliche* Intervall, welches zwischen den

Digitized by Google

beiden Strömen verfloss, bis auf den 10,000ten Teil einer Sekunde berechnen, vorausgesetzt, dass man die Umdrehungsgeschwindigkeit genau kennt. Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Kanonenkugel innerhalb des Rohres der Kanone bewegt, kann auf diese Weise gemessen werden.

434. Elektrische Telephone. Der erste erfolgreiche Versuch, einen Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, wurde im Jahre 1861 von Reis angestellt, dem es gelang, musikalische und andere Töne durch ein unvollkommenes Telephon zu übertragen. Bei diesem Apparate wirkte die Stimme auf eine lose Berührungsstelle in einem elektrischen Stromkreise, und indem jene Teile fester oder loser zur Berührung gebracht wurden (Art. 346), variirte danach der Widerstand des Stromkreises. Der übertragende Teil des Telephons von Reis bestand aus einer Batterie und einem Unterbrecher, welch letzterer aus einem Trommelfell oder Diaphragma ausgespannter Membran gebildet war, und Schallwellen in sich aufnehmen konnte. An demselben war ein dünner, elastischer Platinstreifen befestigt, der beim Vibrieren gegen die Spitze eines Platindrahtes anschlug und auf diese Weise bei jeder Schwingung die Berührung gänzlich oder teilweise herstellte oder unterbrach, genau ebenso, wie dies bei den Kohleberührungen in den neuern Uebertragern von Blake, Berliner etc. der Fall ist. Der empfangende Teil des Apparates bestand aus einem Eisendrahte, der an einem Resonanzboden befestigt war und den eine isolierte Drahtspirale umgab, welche einen Teil des Stromleiters bildete. Die schnelle Magnetisierung und Entmagnetisierung eines solchen Eisenkerns erzeugt hörbare Schallwellen (Art. 113), welche die Höhe eines in den übertragenden Teil hineingesprochenen Tones wiedergeben, da die Höhe eines Tones nur von der Anzahl und nicht von der Gestalt oder der Amplitude der Schwingungen abhängig ist. Aendert sich der Strom weniger plötzlich, so wird der Eisendraht zum Teil magnetisiert und entmagnetisiert und es entstehen dementsprechend Schwingungen von verschiedenen Amplituden und Formen; folglich wird ein solcher Draht in vollkommener Weise

Digitized by Google

als Empfangsapparat dienen, welcher gesprochene Worte wieder hervorbringt, wenn ein guter Geber gebraucht wird. Reis selbst pflanzte mit Hilfe seines Apparates gesprochene Worte weiter fort, aber nur in unvollkommener Weise, denn alle Töne der Sprache lassen sich nicht durch plötzliche Stromunterbrechungen übertragen, welche bei dem Geber von Reis leicht vor sich gehen, wenn in denselben hineingesprochen wird, da der Kontakt ein sehr loser ist. Dieselben erfordern leichte Schwingungen, bald einfache, bald zusammengesetzte, entsprechend der Natur des Tones. Die Vokale werden durch periodische und zusammengesetzte Schwingungen in der Luft erzeugt; während die Konsonanten zum grössten Teil nicht periodisch sind. Falls die sich berührenden Teile nicht zu leicht und die gesprochenen Worte nicht zu laut sind, überträgt der Uebertrager von Reis genau, indem die Platin-Kontakte, vorausgesetzt dass sie sauber sind, in genügender Weise als Stromregulator dienen, um den Strom entsprechend den Vibrationen der Stimme abzuändern.

Reis erfand auch einen zweiten Empfangsapparat, bei dem ein Elektromagnet eine elastisch aufgehängte Eisenarmatur anzog, welche in Folge der Anziehung des mehr oder weniger unterbrochenen Stromes hin und her vibrierte.

435. Das Telephon von Graham Bell. Im Jahre 1876 erfand Graham Bell das Magneto-Telephon. Bei diesem Apparate spricht der Redende gegen eine elastische Platte von dünnem Eisenblech, welche vibriert und jede ihrer Bewegungen auf elektrischem Wege auf eine ähnliche Platte in einem ebenso eingerichteten Telephone an einer entfernten Station überträgt, und sie genau in dieselbe Vibration versetzt, wodurch dann dieselben Töne erzeugt werden. Die Uebertragung der Vibrationen hängt mit den Prinzipien der in der 36. Vorlesung erklärten magneto-elektrischen Induktion zusammen. Fig. 168 zeigt das Bell'sche Telephon in seiner neuesten Gestalt und einen Querschnitt seines Innern. Die Scheibe D befindet sich hinter einem konischen Mundstücke, an welches der Sprecher

Digitized by Google

seinen Mund oder der Hörer sein Ohr hält. Hinter der Scheibe liegt ein Magnet AA, welcher der Länge nach durch den Apparat führt; und um seinen vordern Pol, welcher beinahe die Scheibe berührt, ist eine kleine Spule befestigt, auf welche eine Rolle C aus feinem, isoliertem Drahte gewunden ist, deren Enden mit den Endschrauben FF verbunden sind. Von diesen Apparaten dient der eine als Geber, der andere als Empfänger der Töne; beide sind durch zwei Drähte zu einem Stromkreise verbunden. Eine Batterie ist nicht erforderlich, denn der Geber selbst erzeugt die induzierten Ströme in folgender Weise: Der Magnet AA induziert eine gewisse Anzahl von durch die Rolle C führenden Kraftlinien. Viele von ihnen gehen in die eiserne Scheibe. Bewegt sich diese beim Vibrieren nach dem Magnetpole zu, so wird sie von mehr Kraftlinien getroffen; entfernt sie sich vom Magnetpole, so wird sie von weniger Kraftlinien getroffen. Ihre hin und her gehende Bewegung *ändert also die Zahl der Kraftlinien, welche durch den Hohlraum der Rolle C führen,* und erzeugt demnach (Art. 394) in dem Drahte der Rollen Ströme, deren Stärke dem Wechsel der Anzahl von Kraftlinien proportional ist, welche durch die Rolle führen. Das Bell'sche Telephon kann daher, wenn es als Geber benutzt wird, als magnetelektrischer Generator angesehen werden, der durch Hin- und Hervibrieren Ströme von alternierenden Richtungen in den Draht schickt. Kommen die Ströme am andern Ende an, so fliessen sie in der einen oder andern Richtung durch die Rolle und vermehren oder vermindern daher vorübergehend die Stärke des Magnets. Fliesst der Strom durch die Spiralen in solcher Richtung, dass der Magnet an Stärke zunimmt, so zieht derselbe die vor ihm befindliche Eisenscheibe stärker als zuvor an. Hat der Strom die entgegen-

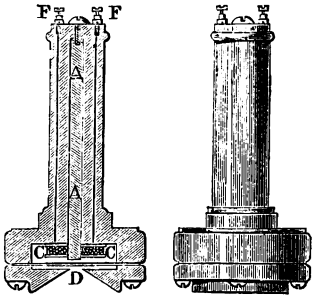

Fig. 168.

Digitized by Google

gesetzte Richtung, so wird die Scheibe weniger angezogen und entfernt sich vom Magnet. Welche Bewegung also auch der Scheibe des gebenden Telephons mitgeteilt wird, die Scheibe des empfangenden Telephons muss dieselbe wiederholen, und versetzt daher die Luft in dieselben Schwingungen, und erzeugt auf diese Weise den Ton von Neuem. Der empfangende Teil des Bell'schen Telephons unterscheidet sich von dem zweiten Emfänger von Reis nur dadurch, dass dort eine dünne, elastische Eisenplatte als Armatur dient, statt eines auf einer elastischen Unterlage schwingenden eisernen Stabes, und dass der zentrale Magnet von Stahl statt von Eisen ist.

436. Das Telephon von Edison. Edison konstruierte zur Uebertragung gesprochener Worte ein Telephon, bei welchem die Vibrationen der Stimme auf ein Diaphragma von Glimmer wirken, wodurch dasselbe eine grössere oder geringere Kompression auf einen Knopf präparierten Lampenrusses ausübte, welcher in den Stromkreis eingeschaltet war. Der Widerstand desselben wird durch den Druck der Berührungsstellen beeinflusst; folglich bietet der Knopf in Folge der sich ändernden Drucke, welche von den Vibrationen herrühren, einem durch den Stromkreis (von der Batterie aus) fliessenden Strome einen wechselnden Widerstand, und die Stromstärke variiert dementsprechend. Dieser variierende Strom kann daher, wie vorher, von einem elektromagnetischen Empfänger des oben beschriebenen Musters aufgenommen werden und dort entsprechende Schwingungen hervorrufen. Edison hat auch einen besonders kräftigen Empfangsapparat erfunden, der mit einer merkwürdigen von ihm entdeckten Eigenschaft zusammenhängt, dass nämlich die Reibung, welche eine gegen einen rotierenden, feuchten Kreidecylinder drückende Platinspitze verursacht, schwächer wird, wenn ein Strom zwischen beiden Körpern hindurchgeht. Wird die Spitze an einer elastischen Scheibe befestigt, so geräth letztere in Schwingungen, welche den veränderlichen Strömen entsprechen, die von dem Geber des Sprechers kommen.

Digitized by Google

436a. Das Telephon von Dolbear. Telephon-Empfänger sind auch von Varley und Dolbear erfunden worden. Dieselben benutzten zur Erzeugung von Tönen die Anziehung zwischen den mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladenen Armaturen eines *Kondensators*. Der Geber wird mit der primären Rolle eines kleinen Induktionsapparates zu einem Stromkreise und die sekundäre Rolle durch die Leitung mit dem Empfangs-Kondensator verbunden. Bei dem Telephon von Dolbear besteht der Empfänger bloss aus zwei dünnen Metallscheiben, die durch eine sehr dünne Luftschicht von einander getrennt und mit den beiden Enden der sekundären Rolle verbunden sind. Je nachdem die veränderlichen Ströme in diesen Kondensator einfliessen und wieder ausströmen, ziehen sich die beiden Scheiben mit grösserer oder geringerer Kraft an; hierdurch entstehen Schwingungen, welche denen des ursprünglichen Tones entsprechen.

437. Das Mikrophon von Hughes. Im Jahre 1878 machte Hughes die Entdeckung, dass ein *loser Kontakt* zwischen 2 Leitern, welche zu einem Stromkreise gehören, in welchen

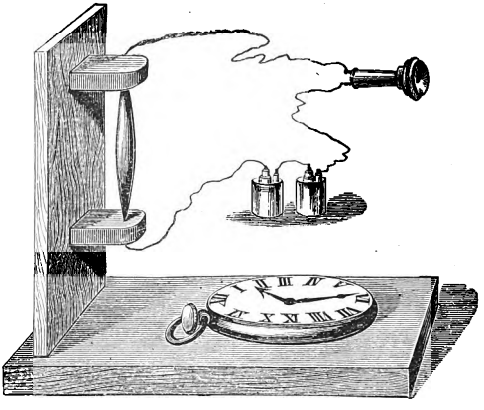

Fig. 169.

eine kleine Batterie und ein Empfangs-Telephon eingeschaltet sind, dazu dienen kann, Töne zu übertragen ohne die Ver-

Digitized by Google

mittlung eines besondern Trommelfells oder Diaphragmas, wie diejenigen von Reis und Edison, weil die geringsten Schwingungen die Grösse des Widerstandes an der Stelle, wo ein loser Kontakt stattfindet, beeinflussen, wenn letzterer sehr empfindlich hergestellt ist. Das **Mikrophon** (Fig. 169) ist eine Anwendung dieses Prinzipes. In der Form, wie sie die Figur darstellt, wird ein kleiner dünner Kohlestift lose zwischen 2 kleine Scheiben aus demselben Stoffe eingeklemmt, welche an einem Resonanzboden von dünnem Fichtenholz befestigt sind; die Scheiben stehen mit 1 bis 2 kleinen Elementen und einem Bell'schen Telephone in Verbindung, welches als Empfänger dient. Die Schwingungen dieses Telephones sind unter Umständen viel grösser, als diejenigen der ursprünglichen Töne und deshalb kann das Mikrophon, wie sein Name andeutet, dazu dienen, schwache Töne zu verstärken, wie z. B. das Ticken einer Uhr oder die Fusstritte eines Insekts, und dieselben hörbar zu machen. Die weniger empfindlichen *Kohleübertrager*, welche häufig in Verbindung mit dem Telephon gebraucht werden, werden bisweilen als besondere Arten des Mikrophons angesehen. Bei einigen dieser Apparate, z. B. bei dem von Blake, hat man ein Trommelfell, ähnlich demjenigen der Telephone von Edison und Reis.

438. Induktions-Waage von Hughes. Die ausserordentliche Empfindlichkeit des Bell'schen Telephons (Art. 435) für die schwächsten Ströme gab Veranlassung, dasselbe zur Auffindung von Strömen zu benutzen, welche zu schwach sind, um auf ein noch so empfindliches Galvanometer zu wirken. Die Ströme müssen jedoch intermittierende sein, denn sonst versetzen sie die Scheibe des Telephons nicht in Vibration. Hughes wandte diese Eigenschaft des Telephons auf einen Apparat an, welcher Induktionswaage (Fig. 170) genannt wird. Eine kleine Batterie B, welche mit einem Mikrophon M verbunden ist, führt durch 2 Drahtrollen P_1 und P_2, welche um in geeigneter Weise aufgestellte Spulen gewunden sind. Ueber diesen beiden primären Rollen befinden sich zwei gleich grosse

Digitized by Google

sekundäre Rollen S_1 und S_2, welche gleich viel Drahtwindungen enthalten. Die sekundären Rollen stehen mit einem Telephon T in Verbindung und sind nach entgegengesetzten Seiten gewunden. Hieraus folgt, dass jedes Mal, wenn ein Strom in den primären Rollen zu fliessen anfängt oder zu fliessen aufhört,

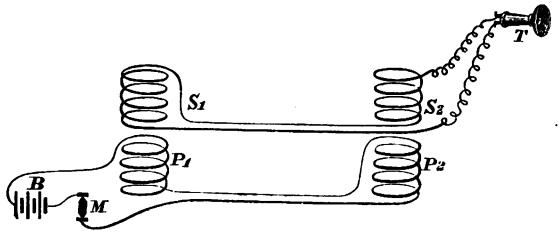

Fig. 170

P_1 einen Strom in S_1 und P_2 einen in S_2 induziert. Da S_1 und S_2 nach entgegengesetzten Seiten gewunden sind, so heben sich die beiden auf diese Weise in ihnen induzierten Ströme gegenseitig auf, und halten sich, wenn sie von gleicher Stärke sind, so genau das Gleichgewicht, dass kein Ton an dem Telephone vernommen wird. Vollkommenes Gleichgewicht kann jedoch nur dann erzielt werden, wenn die Widerstände und die Koeffizienten der gegenseitigen und Selbst-Induktion einander gleich sind. Wird ein plattes Stück Silber oder Kupfer (z. B. eine Münze) zwischen S_1 und P_1 gebracht, so findet in S_1 eine geringere Induktion statt, als in S_2, denn ein Teil der Induktionskraft von P_1 wird jetzt dazu verwendet, um in der Metallmasse (Art. 401) Ströme zu erwecken, und an dem Telephon vernimmt man jetzt einen Ton. Das Gleichgewicht kann jedoch dadurch wieder hergestellt werden, dass man den Abstand zwischen P_2 und S_2 so lange vergrössert, bis die Induktion in S_2 wieder ebenso gross wie die in S_1 geworden ist, wo dann die Töne am Telephon abermals aufhören. Auf diese Weise kann man die relative Leitungsfähigkeit verschiedener Metalle untersuchen, welche man in die Spiralen einführt. Es ist sogar möglich, eine Münze in Bezug auf ihre Aechtheit durch die

Digitized by Google

auf diese Weise gewonnene Angabe ihrer Leitungsfähigkeit zu prüfen. Die Induktionswaage ist auch in der Chirurgie von Graham Bell angewendet worden, um das Vorhandensein einer Kugel in einer Wunde zu entdecken, denn ein Metallstück, welches einige Zentimeter von den Rollen entfernt ist, vermag die Induktion zu stören.

439. **Magnetische Waage von Hughes.** Ein Apparat welcher sich in hohem Grade zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften verschiedener Eisen- und Stahlproben eignet, ist von Hughes im Jahre 1884 construiert worden. Die zu untersuchende Probe wird in eine Magnetisierungs-Spirale A gelegt (Fig. 171) und durch letztere ein Strom geschickt. Derselbe

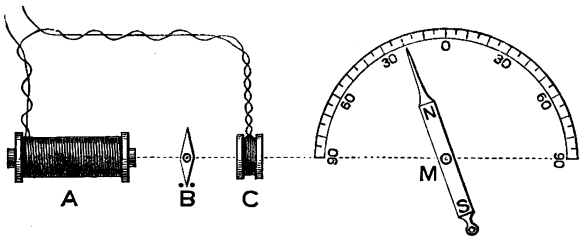

Fig. 171.

lenkt eine leicht beweglich aufgehängte Zeigernadel B ab, welche dann wieder nach dem Nullpunkte geführt wird, indem ein grosser kompensierender Magnet M um seinen Mittelpunkt gedreht wird. Eine kleine Rolle C hält ausserdem der direkten ablenkenden Kraft der Spirale A das Gleichgewicht. Der Verfasser dieses Buches hat gezeigt, dass für den Fall, wo der Abstand zwischen M und B 2, 3 mal grösser ist, als der Magnet M, der Winkel, um welchen letzterer gedreht wird, der magnetischen Kraft des Eisenkernes bei A proportional ist, vorausgesetzt, dass der Winkel nicht grösser als 60° ist.

Digitized by Google

ÜBUNGSAUFGABEN.

Aufgaben zu Kapitel I.

1) Wovon wird das Wort »Elektrizität« abgeleitet?

2) Es sollen verschiedene Methoden der Elektrizitätserregung genannt werden.

3) Ein Körper ist so schwach geladen, dass seine Elektrizität die Blätter eines Goldblattelektroskopes nicht in wahrnehmbarer Weise bewegt. Es soll ein Mittel angegeben werden, wodurch man sich überzeugen kann, ob die Ladung des Körpers positiv oder negativ ist.

4) Es soll ein Versuch beschrieben werden, welcher beweist, dass ein feuchter Faden die Elektrizität besser leitet, als ein trockener Faden.

5) Weshalb betrachten wir die beiden elektrischen Ladungen, welche beim Aneinanderreiben zweier Körper gleichzeitig erzeugt werden, als Elektrizitäten entgegengesetzter Art?

6) Es soll die Wirkungsweise des Elektrophors erklärt werden. Wie kann die Arbeit des Abhebens und Aufsetzens des Deckels dieses Apparates durch eine drehende Bewegung verrichtet werden, so dass man eine kontinuierliche Zufuhr statt einer periodischen erzielt?

7) Erklärung der Drehwaage! Wie kann dieselbe zur Untersuchung der Gesetze über die elektrische Verteilung benutzt werden?

8) Zwei kleine Kugeln sind mit + 24, resp. − 8 Elektrizitäts-Einheiten geladen. Mit welcher Kraft ziehen sich dieselben an, wenn ihr gegenseitiger Abstand 4 Zentimeter beträgt? Antw. 12 Dyn.

9) Welche Kraft werden diese beiden Kugeln auf einander ausüben, nachdem sie sich einen Moment lang berührt haben, und dann in ihre alte Lage gebracht sind?

Antw. Sie stossen sich mit einer Kraft von 4 Dyn ab.

10) Zinkspähne werden durch ein Sieb von Kupferdraht gesiebt, über einer isolierten Zinkplatte, die durch einen Draht mit einem Elektroskop verbunden ist. Was beobachtet man?

Digitized by Google

11) Das Prinzip eines Luftkondensators zu erklären. Aus welchem Grunde zeigen die beiden entgegengesetzt geladenen Platten geringere Spuren von Elektrizität, wenn dieselben nahe zusammengestellt werden, als wenn sie weiter von einander entfernt werden?

12) Man hat 4 Leydener Flaschen A, B, C und D. Von diesen sind A, B und D von Glas, C von Guttapercha. A, B und C sind gleich gross, während D gerade doppelt so hoch und doppelt so weit wie die übrigen ist. A, C und D sind aus gleich dickem Stoffe, während das Glas von B nur halb so dick ist, wie das von A oder D. Es sollen ihre Kapazitäten verglichen werden.

Antw. Setzt man die Kapazität von A = 1, so ist die von B = 2, die von C = $\frac{3}{4}$, die von D = 4.

13) Wie lässt sich nachweisen, dass innerhalb eines geschlossenen Konduktors keine Elektrizität vorhanden ist?

14) Wodurch wird die Ladung eines Körpers gehindert, von der Oberfläche desselben zu entweichen?

15) Es soll die Wirkungsweise der Hamilton'schen Mühle erklärt werden.

16) Zwei Metallkugeln, welche auf gläsernen Stützen ruhen, sind einen Zentimeter weit von einander aufgestellt. Die eine Kugel wird durch eine Maschine allmählich geladen, bis ein Funke von ihr auf die andere überspringt. Es soll genau festgestellt werden, was mit der andern Kugel und in der zwischen beiden Kugeln befindlichen Luft bis zu dem Augenblicke geschah, wo der Funke erschien.

17) Definition der elektrischen Dichte! Einer Kugel von 4 cm Radius wurde eine Ladung von 248 elektrischen Einheiten erteilt. Wie gross ist die Dichte dieser Ladung? Antw. circa 1,23.

Aufgaben zu Kapitel II.

1) Ein Bündel von 12 stählernen Nähnadeln ist an einem Faden, welcher durch die Oere derselben führt, aufgehängt. Wie verhalten sich dieselben, wenn sie sich über einem kräftigen Magnet befinden?

2) Man hat 6 magnetisierte Nähnadeln vertikal durch 6 kleine Korkscheiben gesteckt, welche in einem Gefäss mit Wasser schwimmen, so dass die nordsuchenden Pole nach oben gerichtet sind. In welcher Weise wirken die Nadeln auf einander, und was geschieht, wenn man den südsuchenden Pol eines Magnets über sie hält?

3) Welcher Unterschied ist zwischen Magneten und magnetischer Materie?

4) An Bord eines eisernen Schiffes, von welchem aus ein telegraphisches Kabel gelegt wird, befindet sich ein Galvanometer, mittelst dessen man die Kontinuierlichkeit des Kabels untersuchen will. Wie kann man die Magnet-

Digitized by Google

nadel des Galvanometers vor dem Einflusse des Magnetismus des Schiffes bewahren?

5) Wie lässt sich nachweisen, dass zwei Magnete gleich stark sind?

6) Die Kraft, welche ein Magnetpol auf einen andern ausübt, nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Wie heisst das genaue Gesetz über die magnetische Kraft, und wie lässt sich dasselbe experimentell nachweisen?

7) Welche Kraft übt ein Magnetpol von 9 Einheiten auf einen Pol von 16 Einheiten im Abstande von 6 cm aus? Antw. 4 Dyn.

8) Ein Pol von 40 Einheiten wirkt auf einen andern 5 cm entfernten Pol mit einer Kraft von 32 Dyn. Wie gross ist die Stärke dieses Poles? Antw. 20 Einheiten.

9) Wie verhält sich die magnetische Kraft eines Poles, welcher auf einen Punkt im Abstande von 10 cm wirkt, zu der magnetischen Kraft, welche dieser Pol auf einen 5 cm weit entfernten Punkt ausübt? Es sollen 4 verschiedene Lösungen gegeben werden.

10) Wie erklärt man die Erscheinung der auf einander folgenden Pole (Folgepunkte)?

11) Welche Richtung haben die Linien der magnetischen Induktion (oder »Kraftlinien«) in einer Ebene, in welcher sich ein einzelner Magnetpol befindet? Durch welchen Versuch lässt sich dies bestimmen?

12) Was versteht man unter einer magnetischen Schale? Welches Gesetz gibt das Potential an, welches von einer magnetischen Schale herrührt?

13) Ein stabförmiger Stahlmagnet, welcher horizontal aufgehängt war und in Bristol oszillierte, vollendete in 5 Minuten 110 volle Schwingungen; auf St. Helena machte der Magnet unter gleichen Umständen in 4 Minuten 112 volle Schwingungen. Wie verhält sich die horizontale Komponente des Erdmagnetismus in Bristol zu der auf St. Helena?

Antw. Wie 484 zu 784.

14) In Bristol betrage die Inclination 70^0 und auf St. Helena 30^0. Mit Hilfe der Angaben der vorigen Frage soll die totale Kraft des Erdmagnetismus auf St. Helena berechnet werden, wenn diejenige in Bristol = 0,48 Einheiten gesetzt wird. (Vergl. Anmerkung 1 auf S. 122.)

Antw. 0,307.

15) Eine kleine Magnetnadel wurde im magnetischen Norden vom Mittelpunkte eines kräftigen Stabmagnets aufgehängt, welcher vom (magnetischen) Westen zum (magnetischen) Osten gerichtet war. War der Magnet 3 Fuss von der Nadel entfernt, so betrug die Ablenkung der letztern 2 Grad; bei einer Entfernung von 2 Fuss war die Ablenkung 6^0 30′ und bei einer Entfernung von 1 Fuss, war die Ablenkung 43^0. Hieraus soll das Gesetz der totalen Wirkung zweier Magnete auf einander abgeleitet werden.

16) In welcher Weise werden die täglichen Schwankungen des Erdmagnetismus an verschiedenen Orten zum Zwecke des Vergleichs aufgezeichnet?

Digitized by Google

Aufgaben zu Kapitel III.

1) Zu beweisen, dass die Summe der Potentialdifferenzen in 3 einfachen Volta'schen Elementen, welche hinter einander verbunden sind, dreimal so gross ist, wie die Potentialdifferenz in einem Elemente, vorausgesetzt, dass alle Elemente aus demselben Material sind.

2) Wie lässt sich in einem Volta'schen Elemente die lokale Wirkung und die Polarisation verhüten!

3) Unter der Voraussetzung, dass die Funkenlänge der Potentialdifferenz proportional ist, soll aus den Angaben in Art. 291 und 178 berechnet werden, wie viele Daniell'sche Elemente erforderlich wären, um eine solche Potentialdifferenz hervorzurufen, dass ein Funke von der Länge von 1 Kilometer durch die Luft hindurch erzeugt wird [1]).

4) Wovon hängt der innere Widerstand einer Batterie ab? Wie lässt sich derselbe verkleinern?

5) 24 gleiche Elemente sind in 4 Reihen à 6 parallel geschaltet aufgestellt. Wie verhält sich die elektromotorische Kraft und der Widerstand der so aufgestellten Batterie zur elektromotorischen Kraft und zum Widerstande eines einzelnen Elementes?

Antw. Die E.M.K. der Batterie ist 6 mal grösser, als die eines Elementes. Der gesamte innere Widerstand ist das $1\frac{1}{2}$ fache desjenigen eines Elementes.

6) Um den Aequator eines Erdglobus ist ein mit Seide übersponnener Kupferdraht gelegt. Mit Hilfe der Ampère'schen Regel soll bestimmt werden, in welcher Richtung ein Strom durch den Draht geschickt werden muss, damit der Globus den magnetischen Zustand der Erde darstelle.

Antw. Der Strom muss von Europa über den Atlantischen Ozean nach Amerika fliessen und über den stillen Ozean von Amerika nach Indien; oder mit andern Worten: von Osten nach Westen!

7) Ein Strom von 0,24 Ampère fliesst durch eine Rolle von kreisförmigem Querschnitt in 72 Windungen; der (mittlere) Durchmesser derselben beträgt 20 Zentimeter. Wie stark ist das magnetische Feld, welches der Strom im Mittelpunkte der Spirale erzeugt? Antw. 1,08.

8) Ein Strom, welcher durch die vorige Rolle fliesst, bewirke an einer kleinen in ihrem Mittelpunkte befindlichen Magnetnadel (die Ebene der

---

1) Anm. d. Uebers. Benützt man die Angabe von Art. 291, dass 10000 Volt eine Funkenlänge von 1,369 cm ergeben und setzt die elektromotorische Kraft von 1 Daniell gleich 1,07 (Mittelwert nach Art. 178), so ergeben sich 683 Millionen Elemente.

Digitized by Google

Rolle befinde sich im magnetischen Meridian) eine Ablenkung von 35°, an einem Orte, wo die horizontale Komponente der erdmagnetischen Kraft 0,23 Einheiten beträgt. Es soll die Stromstärke in Ampère berechnet werden (Art. 200). Antw. 0,035.

9) Der von einer dynamo-elektrischen Maschine erzeugte Strom wurde durch einen weiten Ring aus starkem Kupferdraht geführt, in dessen Mittelpunkte sich eine kleine Magnetnadel befand, so dass das Ganze eine Tangentenbussole bildete. Trieb die Dampfmaschine die Armatur des Generators mit einer Geschwindigkeit von 450 Umdrehungen pro Minute, so wurde die Nadel um 60° abgelenkt. Vermehrte sich die Geschwindigkeit bis auf 900 Umdrehungen pro Minute, so betrug die Ablenkung 74°. Es sollen die Stärken der beiden Ströme verglichen werden.

Antw. Der Strom war im zweiten Falle doppelt so stark wie vorher, denn tan 74° ist annähernd gleich 2 tan 60°.

10) Der Strom von 2 Grove'schen Elementen wurde durch ein Sinusgalvanometer geschickt, um die Stromstärke zu messen. Waren die Leitungsdrähte aus starkem Kupferdraht, so mussten die Rollen um 70° gedreht werden, ehe sie der Nadel parallel waren. Wandte man aber lange dünne Drähte für die Zuleitung an, so brauchten die Spiralen bloss um 9° gedreht zu werden. Es soll die Stromstärke im ersten Falle mit der im zweiten Falle verglichen werden, wo der Strom durch die einen beträchtlichen Widerstand bietenden dünnen Drähte floss.

Antw. Die Ströme verhalten sich wie $1 : \frac{1}{6}$ oder wie $6 : 1$.

11) Eine Zinkplatte und eine Kupferplatte sind durch zwei Kupferdrähte mit den beiden Schrauben eines Galvanometers verbunden. Sie wurden dann neben einander in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Gefäss getaucht. Die Galvanometernadel zeigte anfangs eine Ablenkung von 28°, aber 5 Minuten später betrug diese nur noch 11°. Es soll diese Abnahme erklärt werden.

12) Es sollen die Flüssigkeiten in Bezug auf ihre elektrische Leitungsfähigkeit klassifiziert werden.

13) Welche Stoffe erscheinen an der Anode resp. Kathode bei der Elektrolyse folgender Körper: Wasser, verdünnte Schwefelsäure, schwefelsaures Kupferoxyd (in Wasser aufgelöst), Salzsäure (konzentriert), Jodkalium (in Wasser aufgelöst), Zinnchlorür (geschmolzen).

14) Ein Strom wird durch 3 elektrolytische Becher geschickt; der erste enthält angesäuertes Wasser, der zweite schwefelsaures Kupferoxyd, der dritte eine Lösung Silber in Cyankalium. Wieviel Kupfer wird in einer bestimmten Zeit im zweiten Becher abgesetzt, wenn in derselben Zeit 2,268 g Silber im dritten Becher abgesetzt wurden? Und welches Volumen von gemischten Gasen wird in derselben Zeit im ersten Becher entwickelt?

Antw. 0,6614 g Kupfer und 352,8 cbcm von gemischten Gasen.

Digitized by Google

15) Ein Strom geht vermittelst Platinelektroden durch 3 Becher; der erste enthält eine Lösung von Kupfer-Vitriol (schwefelsaures Kupferoxyd), der zweite eine Lösung von Eisenvitriol (schwefelsaures Eisenoxyd), der dritte eine Lösung von Eisenchlorür. Es sollen die Mengen der verschiedenen Körper festgestellt werden, welche an jeder Elektrode beim Durchgange von 1000 Ampère entwickelt werden.

Antw. Erstes Element { Anode: 0,0828 g Sauerstoff. Kathode: 0,3261 g Kupfer.
Zweites Element { Anode: 0,0828 g Sauerstoff. Kathode: 0,2898 g Eisen.
Drittes Element { Anode: 0,3675 g Chlor. Kathode: 0,1449 g Eisen.

16) Eine Tangentenbussole, deren »Konstante« (Reduktionsfaktor) in absoluten Einheiten 0,080 betrug, wurde in den Stromleiter einer Batterie und eines elektrolytischen Bechers eingeschaltet, welcher eine Silberlösung enthielt. Der Strom wurde eine Stunde lang unterhalten; anfangs betrug die beobachtete Ablenkung 36^0; dieselbe fiel jedoch beständig während der Stunde bis auf 34^0. Unter der Voraussetzung, dass die horizontale Komponente der erdmagnetischen Kraft 0,23 beträgt, soll die Menge des Silbers berechnet werden, welches in dem Becher während der Stunde ausgeschieden wird; das absolute elektrochemische Aequivalent des Silbers ist = 0,01134.

Antw. 0,526 g.

17) Ein Stück Zink, an dessen unterm Ende ein Kupferdraht befestigt ist, wird in einer Glasflasche aufgehängt, welche eine Lösung von essigsaurem Blei enthält. Nach einigen Stunden bildet sich eine Bleiablagerung von sonderbarer baumartiger Gestalt (»Baum des Saturns«), welche vom Kupferdrahte nach unten wächst. Wie ist dies zu erklären?

18) Es sollen die Bedingungen angegeben werden, unter denen die Elektrizität eine Muskelkontraktion zur Folge hat. Wie lässt sich die umgekehrte Erscheinung darthun, dass durch Muskelkontraktion elektrische Ströme erzeugt werden?

Aufgaben zu Kapitel IV.

1) Welches ist die Definition von Einheit der Elektrizität, wie dieselbe in absolutem Maass aus den Fundamentaleinheiten der Länge, Masse und Zeit abgeleitet wird?

2) Welchen Abstand muss eine kleine mit 28 elektrischen Einheiten geladene Kugel von einer zweiten Kugel haben, welche mit 56 Einheiten geladen ist, damit sie sich mit einer Kraft von 32 Dyn abstossen?

Antw. 7 cm.

3) Die Entfernung der Erde vom Monde werde (rund) zu 383×10^8 cm

Digitized by Google

angenommen; der Radius der Erde sei 63×10^7 cm und der des Mondes 15×10^7 cm; Mond und Erde seien derart geladen, dass die Oberflächendichte bei beiden den Durchschnittswert von 10 Einheiten pro Quadratzentimeter habe. Es soll die elektrostatische Abstossung zwischen Mond und Erde berechnet werden.

4) Eine kleine Kugel ist mit 24 + elektrischen Einheiten geladen. Die Kraft zu berechnen, mit welcher dieselbe eine positiv elektrische Einheit im Abstande von 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 Zentimetern abstösst. Dann konstruiere man im verjüngten Maassstabe die »Kraftkurve«, indem man die resp. Abstände von einem bestimmten Anfangspunkte aus auf einer Linie von links nach rechts als ebenso viele Zentimeter abträgt und dann die vertikalen Ordinaten gleich den resp. Beträgen macht, welche man für die entsprechenden Kräfte berechnet hat; schliesslich verbinde man noch das so gefundene Punktesystem durch eine Kurve.

5) Definition des elektrostatischen (oder elektrischen) »Potentials«! Nach der im Art. 238 in Kursivschrift angegebenen Regel soll das Potential in einem Punkte A berechnet werden, welcher eine Ecke eines Quadrats von 8 cm Seitenlänge ist, wenn in den andern 3 Ecken B, C, D der Reihe nach Ladungen von + 16, + 34 und + 24 Einheiten sind.

Antw. annähernd 8.

6) Eine kleine Kugel hat eine Ladung von 24 + elektrischen Einheiten. Man berechne das Potential dieser Ladung in Punkten im Abstande von 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 cm. Dann konstruiere man im verjüngten Massstabe die »Potentialkurve« auf die in der 4. Frage angegebene Weise.

7) Was versteht man unter Oberflächen gleichen Potentials? Weshalb ist die Oberfläche eines isolierten Konduktors eine Oberfläche gleichen Potentials? Ist dies immer der Fall?

8) Eine Kugel vom Radius 14 cm wird so lange geladen, bis die Oberflächendichte den Wert 10 erlangt hat. Welche Elektrizitätsmenge ist hierzu erforderlich? Antw. circa 24,630 Einheiten.

9) Wie gross ist das Potential an der Oberfläche dieser Kugel? (Vergl. den letzten Satz in Art. 246.) Antw. circa 1760.

10) Welches ist die elektrische Kraft in einem Punkte ausserhalb jener Kugel, welcher ihrer Oberfläche unendlich nahe liegt? (Art. 251.)

Antw. circa 125,7.

11) Eine Kugel vom Radius 10 cm sei mit 6284 elektrischen Einheiten geladen. Dieselbe gibt darauf an eine sie berührende nicht elektrische Kugel vom Radius 15 cm einen Teil ihrer Ladung ab. Welches sind nach der Trennung die Ladungen und Oberflächendichten beider Kugeln?

Antw. Erste Kugel $q = 2513{,}6$; $\rho = 2$.
Zweite Kugel $q = 3770{,}4$; $\rho = 1{,}33$.

12) Eine Ladung von 8 positiven Einheiten ist in einem Punkte ange-

Digitized by Google

häuft, dessen Abstand vom Mittelpunkte einer Metallkugel 20 cm beträgt. Der Radius der Kugel ist 10 cm. Auf der dem Punkte zugewandten Seite der Kugel wird eine negative Ladung induziert. Es soll innerhalb der Kugel ein solcher Punkt bestimmt werden, dass 4 negative in ihm angehäufte Einheiten auf alle äusseren Punkte ein Potential ausüben würden, welches dem der wirklichen negativen Ladung genau gleich wäre. (Vergl. Art. 250.)

Antw. Der Punkt liegt auf der Linie, welche die äussere positive Ladung mit dem Zentrum der Kugel verbindet, und zwar 5 cm von der Oberfläche entfernt.

13) Zwei grosse parallele Metallplatten haben beide eine positive, aber ungleiche Ladung, indem die Dichte an der Oberfläche von A + 6, und die an der Oberfläche von B + 3 beträgt. Beide Platten haben einen Abstand von 2 cm. Es soll die Kraft bestimmt werden, mit welcher eine + Einheit von A nach B getrieben wird; und ferner die Arbeit, welche eine + Einheit beim Uebergange von A nach B verrichtet.

Antw. Die elektrische Kraft von A nach B = 18,85 Dyn;
Arbeit = 37,5 Erg.

14) Was versteht man unter den Dimensionen einer physikalischen Grösse? Aus dem Gesetze der umgekehrten Quadrate sollen die Dimensionen der Elektrizität abgeleitet werden. Wie lässt sich zeigen, dass die Elektrizität nicht eine Grösse derselben physikalischen Dimensionen ist, wie z. B. die Materie, die Energie oder die Kraft?

15) Konstruktion und Wirkungsweise des Quadrantelektrometers zu beschreiben. Auf welche Weise könnte dieser Apparat zum Selbstaufzeichnen eingerichtet werden?

16) Eine der beiden Belegungen eines Kondensators steht mit der Erde in Verbindung; der andern ist eine Ladung von 5400 Einheiten mitgeteilt. Die hiedurch erzeugte Potentialdifferenz zwischen den Belegungen beträgt 15 (elektrostatische) Einheiten. Welches ist die Kapazität des Kondensators?

Antw. 360.

17) Was versteht man unter spezifischer Induktionskapazität? Weshalb scheint heisses Glas eine grössere spezifische Induktionskapazität zu haben, als kaltes Glas?

18) Die Erscheinung des Residuums in einer Leydener Flasche soll mit der Erscheinung der Polarisation in einem elektrolytischen Becher verglichen werden.

19) Ein Kondensator besteht aus 2 quadratförmigen Metallplatten von je 35 cm Seitenlänge. Zwischen dieselben wird eine 0,4 cm dicke Kautschuckscheibe als dielektrischer Körper gestellt. Wenn nun die spezifische Induktionskapazität des Kautschucks = 2,25 gesetzt wird; welches ist die Kapazität des Kondensators?

Antw. 548,8 elektrostatische Einheiten.

Digitized by Google

20) Es soll die Kapazität eines Telegraphenkabels von einer Meile Länge (in elektrostatischen Einheiten) berechnet werden. Der Kern ist ein Kupferdraht von 0,18 cm Durchmesser, der von einer 0,91 cm dicken Guttaperchaschicht umgeben wird. (Für Guttapercha ist k = 2,46; eine Meile = 160,933 cm). Antw. 82,164 Einheiten.

21) Eine Leydener Flasche teilt ihre Ladung mit 2 andern Flaschen, von denen jede der ersten an Kapazität gleichkommt. Es soll die Energie der Ladung einer Flasche mit der Energie der ursprünglichen Ladung verglichen werden. Antw. $\frac{1}{9}$ so gross.

22) Eine Reihe Leydener Flaschen von gleicher Kapazität sind »in Kaskaden« geladen. Wie verhält sich die totale Energie der einzelnen auf diese Weise geladenen Flaschen zu der einer einzigen Flasche, welche ihre Ladung aus derselben Quelle bezieht?

23) Es sollen die verschiedenen Arten der Entladung aufgezählt und die Bedingungen genannt werden, unter denen sie eintreten.

24) Ein Kondensator von der Kapazität 10,000 sei auf das Potential 14 geladen und dann teilweise entladen, so dass das Potential auf 5 sinkt. Es soll die Wärmemenge berechnet werden, welche durch die Entladung erzeugt wird, unter der Annahme, dass die ganze Energie des Funkens in Wärme umgesetzt wird:

Antw. 0,020357 Wärmeeinheiten.

25) In welcher Weise wird der Durchgang elektrischer Funken durch Luft von einer Aenderung des Druckes beeinflusst?

26) Weshalb wird die Fortpflanzung telegraphischer Signale durch ein untergetauchtes Kabel verzögert, und wie kann man dieser Verzögerung entgegenarbeiten?

27) Wie wird die Potentialdifferenz zwischen der Erde und der darüber befindlichen Luft gemessen? und was lässt sich aus solchen Messungen über die periodischen Schwankungen in dem elektrischen Zustande der Atmosphäre folgern?

28) Die Erscheinung des Gewitters zu erklären.

29) Welche wesentlichen Eigenschaften muss ein Blitzableiter besitzen, wenn derselbe seinen Zweck in befriedigender Weise erfüllen soll? Und weshalb muss er diese Eigenschaften besitzen?

30) Auf welche Weise kann man die Dauer eines elektrischen Funkens messen?

Aufgaben zu Kapitel V.

1) Welches ist die Definition für magnetisches Potential? Es soll das (magnetische) Potential eines 10 cm langen Stabmagnets, dessen Stärke = 80,

Digitized by Google

in einem Punkte gefunden werden, welcher auf der Verbindungslinie der beiden Pole liegt und zwar 6 cm vom nordsuchenden Ende?

Antw. 8,3.

2) Ein nordsuchender und ein südsuchender Pol von der Stärke + 120, resp. — 60 liegen in einer Ebene im Abstande von 6 cm. In welchem Punkte zwischen ihnen ist das Potential = 0? Es soll durch diesen Punkt in der Ebene die Kurve des Nullpotentials gelegt werden.

3) Was versteht man unter der Intensität eines magnetischen Feldes? Ein Magnet von der Stärke 270 liegt in einem gleichförmigen magnetischen Felde von der Intensität 0,166. Welche Kräfte wirken auf seine Pole?

Antw. + 45 Dyn, und — 45 Dyn.

4) Was versteht man unter Intensität der Magnetisierung? Ein rechteckiger Stabmagnet von 9 cm Länge wird magnetisiert, bis die Stärke seiner Pole den Wert 164 erreicht hat. Derselbe ist 2 cm breit und 0,5 cm dick. Wie gross ist die Intensität der Magnetisierung, unter der Voraussetzung, dass derselbe überall gleichförmig magnetisiert ist? Antw. 164.

5) Poisson schlug eine Zwei-Fluidum Theorie des Magnetismus vor; das Wesentliche der Hypothese war, dass in den Molekülen des Eisens und anderer magnetischer Substanzen zwei gleiche Mengen entgegengesetzter Arten eines magnetischen Fluidums vorhanden wären, und dass beim Magnetisieren die beiden Fluida getrennt würden. Welche Thatsachen lassen sich mit Hilfe dieser Theorie erklären und welche nicht?

6) Ein Strom, dessen Stärke in »absoluten« elektromagnetischen Einheiten = 0,05, geht durch einen ringförmigen Draht von 2 cm Radius. Welches ist die Stärke des Feldes im Mittelpunkte des Ringes? Welches ist das Potential in einem Punkte P, dessen senkrechter Abstand vom Umfange des Ringes 4 cm beträgt?

Antw. f = 0,1571; V = ± 0,0421.

7) Welche Grenzen hat die Kraft eines Elektromagnets?

8) Welchen Vorteil gewährt der Eisenkern eines Elektromagnets?

9) Vorausgesetzt, dass der wirkliche Magnetisierungskoeffizient des Eisens den Wert 20 hat, soll die Polstärke eines Elektromagnets berechnet werden, dessen Rollen aus 50 Drahtwindungen von einem Zentimeter Radius im Durchschnitt bestehen. Durch die Rollen geht ein Strom von 2 Ampère und der Kern besteht aus einem 5 cm langen Stabe, dessen Querschnitt = 1 qcm ist. (Vergl. Art. 328 d). Antw. 528 Einheiten.

10) Wie heisst die Maxwell'sche Regel über magnetische Schalen? Aus derselben sollen die von Ampère gefundenen Gesetze über parallele und gegen einander geneigte Ströme abgeleitet werden.

11) Eine kreisförmige kupferne Schüssel steht mit dem Zinkpole einer kleinen Batterie in Verbindung. In die Schüssel wird angesäuertes Wasser gegossen, in welches ein Draht taucht, der von dem Kohlepole der Batterie

Digitized by Google

ausgeht. Um jede Bewegung der Flüssigkeit sichtbar zu machen, sind kleine Korkstücke in dieselbe geworfen. Was geschieht, wenn der nordsuchende Pol eines starken Stabmagnets über die Schüssel gehalten wird?

12) Roget hing eine Spirale aus Kupferdraht in der Weise auf, dass das untere Ende noch soeben in eine Schale mit Quecksilber tauchte. Wurde ein starker Strom durch die Spirale gesandt, so fing dieselbe unaufhörlich an zu tanzen, wobei das untere Ende glänzende Funken erzeugte, sobald dasselbe in das Quecksilber tauchte oder herausgezogen wurde. Wie ist dieser Versuch zu erklären?

13) Obschon noch nicht bewiesen, nimmt man an, dass Ozon stärker magnetisch ist, als Sauerstoff. Welcher Versuch lässt sich hierüber anstellen?

Aufgaben zu Kapitel VI.

1) Wenn der Widerstand eines Telegraphendrahts 13 Ohm pro Meile beträgt, und die E.M.K. eines Leclanché'schen Elementes 1,5 Volt, so soll berechnet werden, wieviele Elemente erforderlich sind, um durch eine Linie von 120 Meilen Länge einen Strom von 12 Milli-Ampère zu senden; es wird dabei vorausgesetzt, dass die im Stromleiter eingeschalteten Apparate einen Widerstand bieten, welcher dem von einem 20 Meilen langen Drahte gleichkommt, und dass der Rückstrom durch die Erde keinem messbaren Widerstande begegnet. Antw. 15 Elemente.

2) 50 Grove'sche Elemente (E.M.K. eines Grove = 1,8 Volt) sind hinter einander geschaltet und durch einen Stromleiter von 15 Ohm Widerstand geschlossen. Wie gross ist die Stromstärke, wenn der innere Widerstand jedes Elements = 0,3 Ohm gesetzt wird. Antw. 3 Ampère.

3) Der Strom, welcher durch den glühenden Kohlefaden einer elektrischen Lampe geht, sei gerade 1 Ampère. Die Potentialdifferenz zwischen den beiden Enden der Lampe betrage, so lange der Strom fliesst, 30 Volt. Wie gross ist der Widerstand des Fadens?

4) Was versteht man unter spezifischem Widerstand? Es soll der Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 Kilometer Länge und 1 mm Durchmesser berechnet werden. (Spez. Widerstand des Kupfers = 1642.)

Antw. 20,9 Ohm.

5) Als ich den Widerstand eines (übersponnenen) Kupferdrahtes maass, der eine Länge von 18,12 m hatte, fand ich 3,02 Ohm. Eine andere Rolle desselben Drahtes hatte einen Widerstand von 22,65 Ohm. Wie lang war dieser Draht? Antw. 135,9 m.

6) Es soll der Widerstand eines Kupferdrahtes von einem Quadratzentimeter Querschnitt berechnet werden, welcher vom Niagara bis New-York reicht (480 km). Antw. 78,8 Ohm.

Digitized by Google

7) Man habe eine unbegrenzte Anzahl telegraphischer Daniell'scher Elemente (Fig. 77), von denen jedes eine E.M.K. = 1,1 Volt und im Durchschnitt einen innern Widerstand von 2,2 Ohm besitzt. Wie gross ist die Stromstärke, wenn 5 solcher Elemente in Serien durch einen Draht verbunden werden, dessen Widerstand = 44 Ohm ist? Antw. 0,1 Ampère.

8) Es soll bewiesen werden, dass im vorhergehenden Beispiele bei einer unbegrenzten Anzahl von Elementen, hinter einander geschaltet, der Strom 0,5 Ampère nicht übersteigen kann.

9) Es soll die Anzahl elektrischer Coulomb berechnet werden, welche in 100 Jahren durch eine Guttapercha-Platte gehen würden, welche 1 cm dick und 1 qcm gross ist, und deren Oberflächen mit Zinnfolie belegt und resp. mit den Polen einer Batterie von 100 Daniell'schen Elementen verbunden sind? Der spezifische Widerstand des Guttapercha sei $3{,}5 \times 10^{23}$ Ohm.
Antw. 9,7 Coulomb.

10) Sechs Daniell'sche Elemente sind hinter einander verbunden. Für jedes derselben ist E = 1,05 Volt, und r = 0,5 Ohm. Zwischen die Pole der Batterie lassen sich 3 Drähte X, Y und Z einschalten, deren Widerstände resp. 3, 30, und 300 Ohm sind. Es soll der Strom (in Ampère) bestimmt werden, welcher fliesst, wenn jeder Draht einzeln eingeschaltet wird, und wenn sie alle zusammen parallel eingeschaltet werden.

Antw. Durch X . . . 1,05 Ampère pro Sekunde.
» Y . . . 0,1909 » »
» Z . . . 0,0207 » »
» alle drei . 1,105 » »

11) Man berechne die Anzahl der Elemente, welche erforderlich sind, um einen Strom von 50 Milli-Ampère durch eine Linie von 114 Kilometer Länge zu senden, wenn der Widerstand $12\frac{1}{2}$ Ohm pro Kilometer beträgt und jedes der benutzten Elemente der Batterie einen innern Widerstand von 1,5 Ohm und eine E.M.K. von 1,5 Volt hat. Antw. 50 Elemente.

12) In einem Stromkreise, dessen äusserer Widerstand 10 Ohm beträgt, befinden sich 20 grosse Leclanché'sche Elemente (E.M.K. = 1,5 Volt, r = 0,5 Ohm pro Element). Welches ist die Stromstärke a) wenn die Elemente alle hinter einander verbunden sind; b) wenn alle parallel geschaltet sind, also alle Zinkplatten und alle Kohleplatten für sich verbunden sind; c) wenn die Elemente in 2 Reihen à 10 aufgestellt sind; d) wenn die Elemente in 4 Reihen à 5 aufgestellt sind?

Antw. a) 1,5 Ampère | c) 1,2 Ampère
b) 0,1496 Ampère | d) 0,702 Ampère.

13) Wie würde man die Elemente jener Batterie am besten anordnen, um durch eine Linie von 100 Kilometer Länge zu telegraphieren, wenn man $12\frac{1}{2}$ Ohm Widerstand pro Kilometer rechnet?

14) Es sind 48 Elemente gegeben, jedes von 1,2 Volt E.M.K. und

Digitized by Google

2 Ohm innerem Widerstande. Wie gruppiert man dieselben am besten, wenn ein möglichst starker Strom durch einen Stromleiter von 12 Ohm Widerstand geschickt werden soll? Antw. In 3 Reihen à 16.

15) Es soll bewiesen werden, dass für eine Batterie von n gegebenen Elementen, deren jedes den Widerstand r hat, und in einem Stromkreise, dessen äusserer Widerstand $= R$ ist, die Stromstärke dann ein Maximum wird, wenn die Elemente in a Reihen aufgestellt werden, wo $a = \sqrt{\frac{nr}{R}}$.

16) Zwei Drähte, deren Widerstände 28, resp. 24 sind, sind einander parallel so in einen Stromkreis eingeschaltet, dass der Strom sich teilt und ein Teil desselben durch diesen, der andere Teil durch jenen Draht fliesst. Welchen Widerstand bieten sie dann dem Strome? Antw. 12,92 Ohm.

17) Ein grosses Chromsäure-Element, dessen innerer Widerstand vernachlässigt werden kann, bringt an einer Tangentenbussole (von geringem Widerstande) durch einen Draht, dessen Widerstand 435 Ohm bekannt ist, eine Ablenkung von 9° hervor. Dasselbe Element ergab eine Ablenkung von 5° an derselben Bussole, als ein Draht von unbekanntem Widerstande in den Stromleiter eingeschaltet wurde. Wie gross war dieser unbekannte Widerstand? Antw. 790 Ohm.

18) Bei einer Wheatstone'schen Brücke, in welcher 10, resp. 100 Ohm als feste Widerstände benutzt wurden, wurde ein Draht eingeschaltet, dessen Widerstand zu bestimmen war; seinem Widerstande wurde das Gleichgewicht gehalten, wenn in dem 4. Zweige der Brücke ein Widerstand von 281 Ohm eingeschaltet wurde. Wie gross war der zu bestimmende Widerstand? Antw. 28,1 Ohm.

19) Eine Batterie von 5 Leclanché'schen Elementen wurde durch einen einfachen Stromleiter mit einem Galvanometer und einem Widerstandskasten verbunden. Nachdem die Widerstände derart angeordnet waren, dass sich eine Ablenkung von 40° ergab, wurde dieselbe durch die Einführung von 150 weitern Ohm auf 29° reduziert. Darauf wurde eine Batterie von 10 Daniell'schen Elementen in den Stromkreis eingeschaltet, und der Widerstand so lange geändert, bis die Ablenkung wieder 40° betrug. Um nun abermals letztere auf 29° zu reduzieren, mussten 216 Ohm eingeschaltet werden. Es soll die E.M.K. eines Leclanché'schen Elementes berechnet werden, wenn diejenige eines Daniell'schen Elementes = 1,079 Volt gesetzt wird. Antw. 1,499 Volt.

20) Wie werden Normal-Widerstandsrollen gewunden und weshalb? Aus welchem Material werden dieselben verfertigt und weshalb?

21) Drei sehr kleine Daniell'sche Elemente ergaben bei einem Sinusgalvanometer, dessen Widerstand vernachlässigt werden konnte, eine Ablenkung von 57°. Wurden 20 Ohm in den Stromleiter eingeschaltet, so fiel

Digitized by Google

die Ablenkung des Galvanometers auf 25^0. Man berechne den innern Widerstand der Elemente. Antw. Jedes 6,6 Ohm.

22) Ein Stück Telegraphenkabel wurde in eine Tonne mit Wasser versenkt und dann kurze Zeit durch eine Batterie von 120 Daniell'schen Elementen geladen. Das Kabel wurde alsdann durch ein Galvanometer von grossem Widerstande entladen, dessen Nadel langsame Schwingungen machte. Die erste Schwingung betrug 40^0. Darauf wurde ein Kondensator, dessen Kapazität $\frac{1}{3}$ Mikrofarad betrug, auf dieselbe Weise geladen und entladen; dies Mal betrug die erste Schwingung der Nadel aber nur etwas über 14^0. Welches war die Kapazität des Kabelstücks? Antw. 0,934 Mikrofarad.

23) Mit Hilfe eines absoluten Elektrometers fand W. Thomson für die Potentialdifferenz zwischen den Polen eines Daniell'schen Elements den Wert von 0,00374 elektrostatischen Einheiten (C.G.S. System). Das Verhältnis des elektrostatischen zum elektromagnetischen Einheitspotential findet sich in Art. 365 und ist $= \frac{1}{v}$. Das Volt wird definiert als 10^8 elektromagnetische Einheiten. Aus diesen Angaben berechne man die E.M.K. eines Daniell'schen Elements in Volt. Antw. 1,115 Volt.

24) Der Radius der Erde ist annähernd 63×10^7 cm. Das Verhältnis der elektrostatischen zur elektromagnetischen Einheit der Kapazität findet sich in Art. 365; die Definition des Farad in Art. 323. Man berechne in Microfarad die Kapazität der Erde (als Kugel betrachtet).

Antw. circa 700 Mikrofarad.

25) Die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes wurde auf folgende Weise bestimmt: 5 neu angefertigte Elemente wurden als Kette mit einem Tangentengalvanometer aufgestellt, dessen Konstante durch Messung bestimmt wurde. Die Widerstände des Stromkreises wurden ebenfalls gemessen und ergaben zusammen 16,9 Ohm. Widerstand und absolute Stromstärke als bekannt vorausgesetzt, könnte man die E.M.K. berechnen. Die Ablenkung betrug 45^0, die Anzahl der Drahtwindungen in der Rolle 10, der Durchschnittsradius der Rolle 11 cm, und der Wert der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus für den Versuchsort 0,18 C.G.S. Einheiten. Es soll die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes abgeleitet werden.

Antw. $1{,}0647 \times 10^8$ C G.S. Einheiten oder 1,0647 Volt.

Aufgaben zu Kapitel VII.

1) Durch eine kleine Kette, deren Glieder abwechselnd aus Platin- und Silberdrähten gemacht sind, wurde ein elektrischer Strom geschickt. Die Platinglieder wurden dadurch bis zur Rotglühhitze erwärmt, während die Silberglieder kalt blieben. Wie ist dies zu erklären?

Digitized by Google

2) Nach dem Joule'schen Gesetze berechne man die Anzahl von Wärmeeinheiten, welche in einem Drahte von 4 Ohm Widerstand entwickelt werden, wenn ein konstanter Strom von 0,14 Ampère 10 Minuten lang durch denselben hindurchgeht. Antw. 11,2 Wärmeeinheiten.

3) Welche Art von Elementen würde sich am besten dazu eignen, um die zur Abfeuerung von Torpedoschüssen erforderlichen Ströme zu liefern?

4) Weshalb verwendet man zur Erzeugung eines konstanten Volta'schen Bogens einen Regulator, wie den von Duboscq?

5) Ich machte einmal den Versuch, durch Anwendung einer Batterie von 3000 telegraphischen Daniell'schen Elementen hinter einander geschaltet elektrisches Licht zu erzeugen, was mir jedoch mislang. Weshalb reichte diese kolossale Batteriekraft für diesen Zweck nicht aus? In welcher andern Weise hätte man die Elemente aufstellen können, um Licht zu erhalten?

6) Eine Batterie von 2 Grove'schen Elementen, ein Galvanometer und eine kleine elektromagnetische Maschine wurden durch einen Stromleiter verbunden. Anfangs war die Maschine belastet, so dass sie sich nur langsam bewegen konnte; als jedoch die Last verringert wurde, drehte sie sich mit enormer Geschwindigkeit. Je schneller jedoch die kleine Maschine arbeitete, um so schwächer war der durch das Galvanometer angezeigte Strom. Wie erklärt man dies?

7) Ein Strom von 9 Ampère erzeugte ein elektrisches Bogenlicht. Beim Messen der Potentialdifferenz zwischen den beiden Kohlestiften vermittelst eines Elektrometers ergaben sich 140 Volt. Wieviel Pferdekräfte verbrauchte diese Lampe? Antw. 1,69 Pferdekräfte.

8) Jemand hat in seiner Werkstatt eine Drehbank, zu deren Drehung eine bestimmte Kraft erforderlich ist. In einer Entfernung von 2 Meilen fällt von einem Hügel ein Wasserstrom, der zwanzig Drehbänke in Bewegung zu setzen vermöchte. Wie lässt sich diese Wasserkraft an den Ort schaffen, wo dieselbe verwertet werden soll?

9) Welchen Nutzen gewährt das Elektrodynamometer? Angenommen, das Moment der Kraft, welche auf die bewegliche Rolle des Elektrodynamometers wirkt, sei dem Produkte der Stromstärken in beiden Rollen proportional. Dann soll bewiesen werden, dass die von einem Strome verrichtete Arbeit wirklich durch das Elektrodynamometer von Marcel Deprez gemessen wird, bei welchem das eine Rollenpaar einen sehr geringen Widerstand und das andere (aus zahlreichen Windungen feinen Drahtes bestehend) einen sehr hohen Widerstand hat, wenn die Rollen der zweiten Art als Nebenschluss für die Lampe, den Motor oder einen anderen Apparat eingeschaltet sind, in dem die zu messende Arbeit verrichtet wird, während die Rollen der ersten Art gleichzeitig vom ganzen Strome durchflossen werden.

Digitized by Google

Aufgaben zu Kapitel VIII.

1) Ein starker Batteriestrom wird für wenige Augenblicke durch einen Stab geschickt, der aus einem Stück Antimon und einem Stück Wismut zusammengelötet ist. Die Drähte werden dann von der Batterie entfernt und mit einem Galvanometer verbunden, welches eine Ablenkung zeigt. Es soll diese Erscheinung erklärt werden.

2) Ein langer Zinkstreifen ist durch eiserne Drähte mit einem Galvanometer verbunden. Die eine Verbindungsstelle wird in Eis gehalten, die andere in Wasser von einer Temperatur von 50° C. Nach der im Art. 381 angegebenen Tabelle soll die den Strom erzeugende elektromotorische Kraft berechnet werden. Antw. 690 Microvolt.

3) Wenn an einer Lötstelle zweier Metalle in Folge des Durchganges eines Stromes Wärme entwickelt wird, wie kann man dann die vom Widerstande herrührende Wärme von derjenigen unterscheiden, welche eine Folge des Peltier'schen Effekts ist?

4) Fliesst ein Strom durch Kupfer, so absorbiert derselbe, wie W. Thomson entdeckte, Wärme, wenn derselbe von einer warmen nach einer kalten Stelle fliesst; wenn der Strom aber durch Eisen fliesst, so absorbiert er Wärme, wenn er von einer kalten nach einer warmen Stelle fliesst. Aus diesen beiden Thatsachen und aus dem allgemeinen Gesetze, dass die Energie auf ein Minimum herabzusinken strebt, soll die Richtung abgeleitet werden, in welcher ein Strom durch einen Schliessungsbogen fliesst, welcher aus zwei Halbringen von Eisen und Kupfer zusammengesetzt ist, indem die eine Verbindungsstelle in heissem Wasser erwärmt, die andere in Eis abgekühlt wird.

Aufgaben zu Kapitel IX.

1) Aus welchen Gründen nimmt man an, dass das Licht eine elektromagnetische Erscheinung ist?

2) In welcher Weise lässt sich die Einwirkung magnetischer Kräfte auf die Richtung der Lichtschwingungen darthun, und welches ist der Unterschied zwischen magnetischen und diamagnetischen Medien in Bezug auf ihre magneto-optischen Eigenschaften?

3) Willoughby Smith machte die Entdeckung, dass der Widerstand des Selens geringer ist, wenn dasselbe dem Lichte ausgesetzt wird, als im Dunkeln. Es soll der Apparat beschrieben werden, den man zur Untersuchung dieser Erscheinung anwenden würde. Wie müsste der Versuch angestellt werden, wenn man erfahren wollte, ob die Grösse der elektrischen Wirkung der aufgefallenen Lichtmenge proportional sei?

Digitized by Google

Aufgaben zu Kapitel X.

1) Die Enden einer Rolle aus feinem isoliertem Drahte sind mit den Enden eines Galvanometers von grossem Widerstande verbunden. In den Hohlraum der Rolle wird langsam ein stabförmiger Stahlmagnet eingeführt und dann plötzlich wieder herausgezogen. In welcher Weise wird die Galvanometernadel affiziert?

2) Um die Aussenseite einer hohen, cylinderförmigen Flasche sind zwei feine, mit Seide übersponnene Drähte gelegt, von denen jeder aus zahlreichen Windungen besteht. Die Enden der einen Rolle sind an einer Batterie befestigt, die der andern an einem empfindlichen Galvanometer. Wird ein eiserner Stab in die Flasche gesteckt, so beobachtet man in den Rollen des Galvanometers einen momentanen Strom. Wird der Stab wieder herausgezogen, so beobachtet man einen zweiten momentanen Strom, der jedoch die entgegengesetzte Richtung hat. Wie erklärt man diese Erscheinungen?

3) Ein Klappfenster mit eisernem Rahmen liegt nach Norden heraus; die Angeln befinden sich auf der Ostseite. Was geschieht, wenn das Fenster geöffnet wird?

4) Es soll die Einrichtung der Induktionsrolle erklärt werden. Welchen besondern Nutzen gewähren der Kondensator, der automatische Unterbrecher und der Eisenkern?

5) Es soll die Stärke des Feldes zwischen den Polen eines Elektromagnets gemessen werden, der durch einen Strom aus konstanter Quelle erregt wird. Wie liesse sich zu diesem Zwecke Faraday's Entdeckung der Induktionsströme verwenden?

6) Was versteht man unter »Extraströmen«? Eine kleine Batterie wurde durch einen Stromleiter mit einer Rolle aus feinem Draht und mit einem Galvanometer verbunden, an welchem der Strom eine konstante, aber kleine Ablenkung hervorbrachte. Ein unmagnetisierter Eisenstab wurde in den Hohlraum der Rolle eingesenkt und darauf wieder herausgezogen. Die Galvanometernadel entfernte sich einen Moment lang aus ihrer ersten Lage, um dann in dieselbe zurückzukehren und hierauf eine weitere Schwingung als zuvor auszuführen. Dann blieb sie zuletzt bei ihrer ursprünglichen Ablenkung stehen. Wie erklären sich diese Erscheinungen?

7) Inwiefern unterscheiden sich dynamo-elektrische Maschinen von magnetelektrischen Maschinen? Woher stammt bei den erstern der Magnetismus der Feld-Magnete? Woher stammt bei den letztern die dynamische Energie der Ströme?

8) Die ältern magnetelektrischen Maschinen erzeugten nur intermittierende Ströme, und diese hatten gewöhnlich eine alternierende Richtung. Mittelst welcher Vorrichtung werden bei den neuern magnetelektrischen Generatoren kontinuierliche und gleich gerichtete Ströme erzeugt?

Digitized by Google

9) Eine schwingende Magnetnadel kommt früher in Ruhe, wenn sich unter ihr eine Kupferplatte befindet, als wenn eine Glas- oder Holzplatte darunter liegt. Wie erklärt man diese Erscheinung?

10) Wie kommt es, dass beim Schliessen des Stromkreises der Strom erst allmählich zu seiner vollen Stärke anwächst, besonders wenn grosse Elektromagnete im Stromkreise eingeschaltet sind?

11) Als Foucault das schwere Metallrad seines Gyroskopes zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets in Rotation versetzte, fand er, dass das Rad warm wurde und stehen blieb. Weshalb? Woher stammte die Wärme?

12) Die Stärke des Feldes zwischen den Polen eines grossen Elektromagnets wurde auf folgende Weise bestimmt: Eine kleine kreisförmige Rolle, welche aus 40 Windungen eines dünnen isolierten Drahtes bestand, der auf eine Haspel gewunden war, wurde mit den Enden eines Galvanometers von grossem Widerstande verbunden, das eine schwere Nadel hatte. Als man jene Rolle plötzlich um 180° drehte, ergab die erste Schwingung der Galvanometernadel eine Ablenkung von 6°. Die totale Intensität der erdmagnetischen Kraft betrug für jenen Ort 0,48 Einheiten. Die Empfindlichkeit des Galvanometers wurde darauf mittelst eines Nebenschlusses auf $\frac{1}{100}$ reduziert. Die kleine Rolle wurde zwischen die Pole des Elektromagnets gebracht und wieder plötzlich umgekehrt; die erste Schwingung der Galvanometernadel erreichte 40°. Welches war die Stärke des Feldes zwischen den Polen?

Antw. 315,7 Einheiten.

Aufgaben zu Kapitel XI.

1) Ein einzelnes Daniell'sches Element genügt nicht, um angesäuertes Wasser zu elektrolysieren, wie gross das Element auch sein möge. Andrerseits genügen 2, wenn auch kleine, Daniell'sche Elemente, um eine kontinuierliche Elektrolyse des angesäuerten Wassers zu bewerkstelligen. Wie ist dies zu erklären?

2) Wenn 1 Gramm Zink sich mit Sauerstoff verbindet, so werden 1301 Wärmeeinheiten entwickelt. Wird dieses Zinkoxyd in Schwefelsäure aufgelöst, so werden 369 weitere Wärmeeinheiten gebildet. Um eine äquivalente Menge schwefelsaures Kupferoxyd in Schwefelsäure und Kupferoxyd zu zerlegen, ist ein Aufwand von 588 Wärmeeinheiten erforderlich. Zur Trennung des Kupfers vom Sauerstoff dieses Oxyds sind dann ferner 293 Wärmeeinheiten erforderlich. Das absolute elektrochemische Aequivalent des Zinks ist 0,003412 (vergl. Art. 212) und Joule's dynamisches Wärmeäquivalent ist 42×10^6. Aus diesen Angaben soll die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes berechnet werden.

Antw. $1{,}1306 \times 10^8$ C.G.S Einheiten oder 1,1306 Volt

Digitized by Google

3) Es soll der Vorgang des Ladens einer sekundären Batterie erklärt werden. Welche chemische Vorgänge beobachtet man während des Ladens und während des Entladens?

4) Die meisten Flüssigkeiten, welche die Elektrizität leiten, werden zersetzt, während sie leiten (ausgenommen geschmolzene Metalle). Wie ist die von Faraday beobachtete Thatsache zu erklären, dass die Stoffmenge, welche durch die Flüssigkeit getrieben und an den Elektroden abgesetzt wird, der durch die Flüssigkeit gehenden Elektrizitätsmenge proportional ist?

5) Es soll die Methode beschrieben werden, wie Holzschnitte auf elektrischem Wege vervielfältigt werden.

6) Wie verfährt man, um Löffel aus Nickel durch Elektro-Ablagerung zu versilbern?

Aufgaben zu Kapitel XII.

1) Es soll eine Anordnung der Apparate angegeben werden, wonach eine einfache Drahtlinie von einem Beamten auf jeder der beiden Endstationen dazu benutzt werden kann, um nach der andern Station zu telegraphieren, unter der Voraussetzung, dass jedesmal, wo der Beamte nicht telegraphiert, sein Apparat mit der Drahtlinie in Verbindung steht, und mit der Batterie derselben Station nicht in Verbindung steht.

2) Welche Vorteile hat der Morse'sche Apparat vor den Nadelapparaten voraus, welche Cooke und Wheatstone in die Telegraphie einführten?

3) Es soll der Nutzen und die Einrichtung eines Relais auseinandergesetzt werden.

4) In gewissen Fällen (Doppel- und Gegensprechen) ist es wünschenswert, die Telegraphenapparate in der Weise anzuordnen, dass dieselben nur auf solche Ströme reagieren, welche in einer bestimmten Richtung durch die Linie kommen. Wie geschieht dies?

5) Auf der einen Station wird eine Batterie aufgestellt. Auf einer 8 Meilen entfernten Station wird eine Galvanometernadel um eine bestimmte Anzahl von Graden abgelenkt, wenn der Draht ihrer Rolle in 12 Windungen um die Nadel führt; für Linie und Galvanometer wird Draht von gleicher Beschaffenheit verwendet. Für eine Entfernung von 200 Meilen erreicht man dieselbe Ablenkung, wenn die Rolle des Galvanometers 24 Windungen hat. Es soll durch Rechnung nachgewiesen werden a) dass der innere Widerstand der Batterie gleich dem von 40 Meilen Drahtlänge ist; b) dass 40 Windungen bei der Rolle des Galvanometers erforderlich sind, um dieselbe Ablenkung auf einer 360 Meilen entfernten Station zu bewirken.

6) Angenommen, ein Atlantisches Kabel wäre beim Legen desselben abgerissen. Wie könnte man den Abstand der gerissenen Stelle vom Uferende ermitteln?

Digitized by Google

7) Angenommen, der Kupferkern eines unterseeischen Kabels wäre in irgend einem Punkte gesprungen, während die äussere Guttaperchahülle nicht beschädigt worden wäre. Wie kann man durch am Ufer anzustellende Versuche die Lage der schadhaften Stelle ermitteln?

8) Es soll die Einrichtung und die Wirkungsweise einer elektrischen Glocke erklärt werden.

9) Auf welche Weise und weshalb können elektrische Ströme bei solchen Apparaten angewendet werden, durch welche sehr kurze Zeitintervalle gemessen werden.

10) Beschreibe das Graham Bell'sche Telephon und erkläre 1) wie dasselbe als Geber, 2) als Empfänger wirkt?

11) Es soll eine Art von Telephon beschrieben werden, bei welchem die Schallwellen in der Weise übertragen werden, dass dieselben Aenderungen in dem Widerstande eines Stromkreises mit konstanter elektromotorischer Kraft erzeugen.

12) Zwei Rollen aus dünnem, isoliertem Drahte, A und B, die vollkommen gleich sind und auch dieselbe Anzahl von Windungen haben, werden auf eine gemeinschaftliche Achse gesteckt, im Abstande von 25 cm von einander. Sie werden durch einen Stromleiter mit einander und mit der sekundären Rolle eines kleinen Ruhmkorff'schen Induktionsapparates verbunden, und zwar so, dass die Ströme in entgegengesetzten Richtungen durch die beiden Rollen fliessen. Eine dritte Rolle aus feinem Drahte, C, ist mit beiden Enden an ein Bell'sches Telephon geknüpft, an welches der Experimentierende sein Ohr hält, während er diese dritte Rolle zwischen die beiden andern hält. Er findet, dass das Telephon keinen Ton von sich gibt, so lange sich C genau in der Mitte zwischen A und B befindet; dagegen vernimmt er Töne, wenn C näher an A als an B liegt oder näher an B als an A. Ferner findet er, dass, wenn in A ein Stück Eisendraht gelegt wird, das Telephon erst dann verstummt, wenn C näher an B als an A liegt. Endlich findet er, dass, wenn zwischen A und C eine Scheibe aus Messing, Kupfer oder Blei eingeschaltet wird, C näher an A als an B gehalten werden muss, um das Telephon zur Ruhe zu bringen. Wie ist dies zu erklären?

Digitized by Google

NAMEN- UND SACH-REGISTER.

NB. Die Zahlen geben die Paragraphen an!

Aal, elektrischer 68.
Abkühlung einer Lötstelle 380.
Ablenkung, Methode der — 118. 123. 325a.
Abstossung s. Anziehung.
Akkumulator 47. 48. 266.
Aldini 229.
Amalgam, elektrisches 41.
Amalgamierte Zinkplatten 162.
Ammeter 200a.
Amöben 230.
Ampère 331. 332. 333. 334. 338. 423.
Ampère, das 323.
Ampère'sche Regel 186.
Ampère'scher Tisch 333.
Animalische Elektrizität 68. 231.
Anion 210.
Anode 207.
Anziehung und Abstossung
— elektrischer Körper 1. 3. 18. 20. 66. 236.
— von Magneten 76. 80. 110. 332.
— von Strömen 331.
— Versuche über — 43.
Aequator, magnetischer 78.
Aequivalente, elektrochemische 212.
Arago 191. 304. 326. 401.
Armatur
— eines Magnets 101.
— einer dynamo-elektrischen Maschine 407. 409. 410.
Armstrong 44.
Astatische Magnetnadeln 190.
Aufstellung einer Batterie 181.
Auslader 51. 54.
Ayrton und Perry 72. 200a; 271. 360d; 365.

B A. Einheit 323. 363. 364.
Bain 218.
Bancalari 344.
Barclay 270.
Batterie
— Leydener Flaschen 54.
— Volta'sche 154. 167. 178. 182.
— Chromsäurebatterie 165.
— sekundäre 415.
— hört auf zu wirken 160.
Beccaria 223. 306.
Becherapparat 151.
Becquerel, A. 307. 339.
— E. 389.
— H. 387.
Bell, Graham 389. 435.
Bennet 13. 23. 25.
Bernstein 1.
Bertsch 45.
Bifilares Aufhängen 118. 262. 336.
Bilder, elektrische 250.
Biot 30. 138. 307.
Blitz 9. 302. 304.
— Dauer desselben 296. 304.
Blitzableiter 32. 305.
Blut, Diamagnetismus desselben 339.
Bogen, Volta'scher 371.
Boltzmann 270. 271. 390.
Borazit 67.
Boyle 2.

Digitized by Google

Brennen durch Elektrizität 369.
British Association, s. B.A. Einheit.
Brücke, Wheatstone'sche 358.
Brugmans 339.
Brush 411.
Bunsen 172.
Büschelentladung 290.
Bussole
— Tangenten 199.
— Sinus 201.

Cabot 136.
Cailletet 291.
Callan 172.
Callaud 176.
Canton 18. 41.
Carré 45. 97.
Cavallo 3. 302. 304. 306. 423.
Cavendish 268. 269. 286.
Ceca 306.
Chemische Probe für schwache Ströme 218. 286
Chemische Vorgänge
— in der Batterie 159.
— ausserhalb der Batterie 205. 412.
— bei der Funkenentladung 286.
— Gesetze über 166 211. 417.
Chronometer, elektr. 433.
Clark 177.
Clausius 418.
Columbus 136.
Coulomb 15. 16. 35. 117. 119. 235. 245. 248.
Coulomb, das 323.
Crookes 293. 300.
Cruickshank 169.
Cumming 382.
Cuneus 52.
Cuthbertson 38. 289.

Dalibard 302.
Daniell 170.
Dauer des Funkens 296.
Davy'sche Batterie 175.
Davy, Humphrey 326. 371. 417c.
Deklination, magnetische 136.
— Variationen der D. 136. 141.
De Haldat 111.
De la Rive 194.
De la Rue 174. 291. 420.
Dellmann 260.
Destillation, elektrische 223.
Dewar 225. 231.
Diagramm, thermo-elektrisches 383.
Diamagnetismus 87. 339.
— von Flammen 344.
— von Gasen 340.
— des Blutes 339.
Diaphragmenströme 224.
Dichte, der Ladung 35. 248.
— magnetische 127. 311.
Dielektrische Kapazität s. Spezifische Induktions-Kapazität.
Dielektrische Körper 8. 49. 270.
Dielektrische Spannung 56. 272.
Dielektrische Stärke 284.
Differential-Galvanometer 203.
Dimensionen s. Einheiten.
Dolbear 436.
Donner 9. 304.
Doppelsprechen 428.
Drache, elektrischer 302.
Drehwage 15. 119.
Druck als Elektrizitätsquelle 65.
Drucktelegraph 423.
Dubosq 372.
Dufay 4. 27.
Duter 273.
Dyn, das 255.
Dynamische Elektrizität s. strömende Elektrizität.
Dynamo-elektrische Maschinen 408.

Edison 216. 374. 411a. 428. 436.
Edlund 221.
Ei, elektrisches 292.
Einheit
— der Potentialdifferenz 242. 322. 323.
— der elektromotorischen Kraft 322. 323.
— des Widerstandes 322. 323.
— der Stromstärke 196. 322. 323.
— elektrostatische 17. 236.
— der Kapazität 247.
— der Elektrizitätsmenge 17. 236.
Einheiten
— fundamentale und abgeleitete 254. 255.
— Dimensionen derselben 258. 324.
— physikalische Dimensionen derselben 258. 324. 351.
— magnetische 321.
— elektromagnetische 322. 323.
— elektrostatische 257.

Digitized by Google

Einheiten, praktische 323
Einheitsflasche 259.
Einheitspol, magnetischer 125.
Eisenkern, magnetischer 76.
Eisenoxyd, magnetisches 76. 172 Anm.
Elektrizität
— Theorie der 6. 300.
— atmosphärische 64. 301. 306.
Elektrische Körper 1.
Elektrische Vergoldung und Versilberung 421.
Elektrisiermaschine s. Maschine.
Elektrochemie 412.
Elektrochemische Aequivalente 211. 212.
Elektroden 207.
— unpolarisierbare 231.
Elektrodynamik 331.
Elektrodynamometer 336. 378a.
Elektrokapillare Erscheinungen 225.
Elektrolyse 208.
— Gesetze derselben 211. 414. 417.
— des schwefelsauren Kupferoxyds 209.
— des Wassers 207. 413.
— Theorie derselben 414.
Elektrolyt 207. 417.
Elektrolytische Konvektion 418.
Elektromagnet 98 326.
— Gesetze desselben 328.
Elektromagnetische Maschinen 375.
Elektromagnetische Theorie des Lichts 390.
Elektromagnetismus 310. 326.
Elektrometallurgie 419.
Elektrometer
— Torsions- 15.
— mit geteiltem Ring 71.
— Kapillar- 225. 265.
— Dellmann'sches 260.
— Abstossungs- 260.
— Peltier'sches 260. 307.
— absolutes 261.
— mit Anziehungsscheibe 261.
— tragbares 261.
— Quadrant- 262.
Elektromotoren 375.
Elektromotorische Kraft 155.
— Messung derselben 360.
— Einheit derselben 322. 323.
Elektro-Optik 385.
Elektrophor 22.
— kontinuierliches 23. 45.
Elektroskop 11.
Elektroskop, Bohnenberger'sches 13. 264
— Goldblatt- 13. 25.
— Fechner'sches 264.
— Entladungs- 259.
— Strohnadel- 12.
— Henkel'sches 264.
— Quadrant- 14.
— mit Markkugeln 2. 3.
— Kondensator- 71. 149.
Elektrostatik 7. 233.
Elektrotypie 420.
Element
— Volta'sches 152.
— mit einer Flüssigkeit 169.
— mit 2 Flüssigkeiten 170.
— beste Aufstellung der Elemente 351.
Energie der Ladung
— einer Leydener Flasche 270.
— des elektrischen Stromes 378.
Entlader s. Auslader.
Entladung, elektrische 7. 280.
— Büschelentladung 43.
— durch Konvektion 43. 283.
— durch Flammen 7. 291.
— durch Verdunsten 223.
— durch Leitung 282.
— Funken- 281.
— Einfluss eines Magnets auf dieselbe 294.
— durchbohrende Kraft derselben 284.
— Wirkungen derselben 43. 284. 286.
— Einfluss von Spitzen 43. 290. 302.
— Glüh- 290. 302 Anm.
— Grenze derselben 248.
— Geschwindigkeit derselben 296.
— empfänglicher Zustand derselben 294.
— Entweichen derselben 299.
Erde, als Magnet 88.
— elektrostatische Kapazität der Erde 325b.
— magnet. Moment der Erde 325b.
— als Rückdraht 423.
Erdmagnetismus 88. 135.
— Intensität desselben 313.
Erdströme 275. 403.
Erg, das 255.
Erwärmung einer Lötstelle 380.
Everett 307. 313.
Expansion, elektrische 273.
Extrastrom 404.

Farad, das 276. 323.

Digitized by Google

Faraday 6. 21. 31. 34. 108. 166. 211. 214. 217. 218. 269. 271. 272. 274. 286. 290. 291. 339. 340. 344. 375. 387. 391. 401. 402.
Farbe des Funkens 289.
Faure 415.
Favre 368.
Fechner 264.
Feddersen 296
Fehlerprobe 427.
Feld, magnetisches 105. 191. 312. 327.
Fernwirkung 21. 56. 272.
Ferromagnetische Körper 339.
Feuchtigkeit 1. 8. 299.
Figuren
— magnetische 108. 109. 110. 126. 191.
— elektrische 297.
Flächenblitz 304.
Flächendichte s. Oberflächendichte.
Flammen
— als Elektrizitätsquelle 62.
— Entladung durch dieselben 7. 291.
— Diamagnetismus derselben 344.
— Ströme derselben 291.
Fleischfressende Pflanzen 230.
Fleming 182.
Flugrad, elektrisches 43.
Fluida, magnetische 91.
Flüssigkeiten
— Leitung derselben 205.
— Widerstand derselben 348.
Folgepunkte bei Magneten 104. 109.
Fontana 273.
Foucault 372. 398,
Franklin 6. 35c. 43. 47. 55. 226. 279. 288. 302. 305. 309.
Freie Elektrizität 24. 149 Anm.
Froment 375.
Froschschenkel 148. 229.
Füller 45. 261. 262.
Funke 9. 43. 281.
Funkendauer 296.
Funkenlänge 44. 291. 302.

Galvani 148. 229. 231.
Galvanische Batterie s. Volta'sche B.
Galvanische Elektrizität s. strömende Elektrizität.
Galvanischer Geschmack 227.
Galvanismus s. strömende Elektrizität.
Galvanometer 197.
— astatisches 198. 231.
Galvanometer, absolutes 200.
— ballistisches 204.
— Spiegel- 202.
— Sinus- 201.
— Tangenten- 199.
— Differential- 203.
— von Helmholtz 199.
— von Du Bois Reymond 231.
— Konstante desselben 200.
Galvanoplastik s. Elektrotypie.
Galvanoskop 188.
Gasbatterie 416.
Gase, Widerstand derselben 158.
Gassiot 294. 300.
Gaugain 66. 199. 259.
Gauss 313. 325a. 325b.
Gay-Lussac 307.
Gebundene Elektrizität 24. 149 Anm.
Gegensprechen 275. 428.
Geissler'sche Röhren 291.
Gernez 223.
Geschmack, galvanischer 227.
Geschwindigkeit
— des Telegraphierens 274. 275. 296. 430.
— der Entladung 296.
— des Lichtes 365. 390.
Gewitter 302. 303.
Gibson 270.
Gilbert 1. 9. 12. 78. 83. 84. 85. 88. 96. 97. 99. 108. 135. 291.
Glaselektrizität 4.
Glocken, elektrische 432.
Glockenspiel, elektrisches 43.
Glühen von Drähten 369.
Glühentladung 290. 302 Anm.
Glühlicht, elektrisches 374.
Goldblattelektroskop s. Elektroskop.
Gordon 270. 271. 291. 387.
Gramme 410.
Gravitationsbatterie 176.
Gray 27. 302.
Grotthuss 160. 418.
Grove 113. 171. 291. 416.
Guericke 3. 9. 38.

Hall 337.
Hankel 264.
Harris 259. 261. 291.
Harzelektrizität 4.
Hauchfiguren 297.
Heberschreiber 431.

Digitized by Google

Helmholtz 199. 228. 405. 418.
Henry 406. 423.
Holtz 46. 293 Anm. 300.
Hopkinson 53. 270. 272.
Horizontale Komponente des Magnetismus 123 138.
Hughes 423. 437.
Humboldt 68. 228. 229.
Hunter 228.
Hydroelektrisiermaschine 44.

Indexbezeichnung 325b.
Induktion von Ladungen 18.
Induktion, magnetische 89. 313.
— magnet-elektrische 391.
— von Strömen 391.
Induktion-Konvektionsmaschine 45.
Induktionskapazität
— spezifische 21. 49. 268. 272.
Induktionskoeffizient 342.
Induktionsrolle 398.
Induktorium 398.
Induzierte elektrische Ladungen 18.
Induzierte Ströme 391.
Inklination 137.
— Variation derselben 141.
Inklinationsnadel 137.
Intensität
— des Stromes 179.
— des Erdmagnetismus 138. 325a.
— eines magnetischen Feldes 312.
— des Magnetisierens 313.
Inversion, thermoelektr. 382.
Ionen 210.
Isogonische Linien 139.
Isoklinische Linien 139.
Isolatoren 8. 27.

Jablochkoff 182. 373.
Jacobi 162. 375. 377. 420.
Jenkin 274. 296. 328.
Joule 113. 255. 306. 330. 367. 414.
Joule'scher Effekt 367. 380.

Kabel,
— atlantisches 274 Anm. 275. 296. 429.
— unterseeisches 429.
— als Kondensator 274. 296 430.
Käfig, elektr. 34.
— magnet. 84.
Kalibrieren eines Galvanometers 198.
Kapazität
— Definition 246.
— Messung derselben 362.
— eines Akkumulators oder Kondensators 50. 267. 277.
— eines Konduktors 37. 47. 247. 277.
— einer Leydener Flasche 50. 267.
— spezifische Induktionskapazität 21. 49. 268. 272.
— Einheit der K. 247. 276.
Karten, magnet. 136. 139. 169.
Kaskadenförmige Aufstellung 279.
Kathode 207.
Kation 210.
Kerr 114, 273. 386. 388.
Kerze, elektrische 373.
Kinnersley 288.
Kirchhoff 353.
Kobalt, Magnetismus desselben 86.
Koeffizient
— der magnetischen Induktion 89, 313.
— der gegenseitigen Induktion 320. 397.
— des gegenseitigen Potentials 320.
Koerzitivkraft 89.
Kohlrausch 211 Anm. 272.
Kommutator 375. 399. 407.
Kompass 79. 134. 136.
Kondensation 48.
Kondensator 48. 267.
— Normalkondensator 276.
— mit Platten 48. 268. 267.
— mit Zinnfolie 47. 275.
— Anwendung des Kondensators 275.
Kondensator-Elektroskop 71. 149.
Kontakt-Elektrizität 71. 149.
Kontakt-Reihe der Metalle 72.
Konvektion der Elektrizität 45. 337.
Konvektion-Induktionsmaschine 45.
Konvektionsströme 337.
Konvektionsströmungen an Spitzen 35a. 43. 249.
Kosten der durch Elektrizität erzeugten Kraft 378.
Kraft, elektrische 155 Anm. 241. 251. 252.
— magnetische 83. 118. 155 Anm. 325a. 310e.
— elektromotorische 155.
Kräftepaar, magnetisches 123.
Kraftlinien, elektrische 243.

Digitized by Google

Kraftlinien, magnetische 89. 108. 109. 110. 310. 312. 316.
— erzeugt durch Ströme 191. 320. 327. 334.
Kraftröhren 243. 311.
Kraftübertragung 376.
Krümmung
— Einfluss derselben auf Oberflächendichte 35. 249.
Krystalle,
— Elektrizität derselben 66.
— dielektrische Eigenschaften 270.
— Magnetismus derselben 343.
Krystallisation 61.
Kugel, Verteilung der Ladung auf derselben 35a. 248. 249.
Kurven, s. Figuren.

Ladung, elektrische 7.
— haftet an der Oberfläche 27.
— Rest- einer Leydener Flasche 53. 272.
Lamellare Magnetisierung 107.
Lamellar-Magnete 95.
Lampen, elektrische 372.
Länge des Funkens 291.
Le Baillif 339.
Leclanché 173.
Leiter und Nichtleiter 8. 27.
Leitung 27. 158.
— von Flüssigkeiten 205.
— von Gasen 158.
Leitungsfähigkeit 158. 346. 348.
Lemonnier 306.
Lenz 367. 396.
Leydener Flasche 51.
— zerlegbare 55.
— Entdeckung derselben 52.
— Entladung derselben 51. 295.
— Kapazität derselben 50. 267. 277.
— Kaskadenförmige Aufstellung 279.
— Energie der Ladung derselben 278.
— Sitz der Ladung derselben 55.
— Funken derselben 289. 296.
— Einheit derselben 259.
— Theorie derselben 267.
Licht,
— elektrisches 371.
— beeinflusst den Widerstand 389.
— Drehung der Polarisationsebene 114. 387. 388.
— elektromagnetische Theorie desselben 365. 390.
Lichtenberg 297.
Lichtwirkungen des Funkens 289. 400.
Lippmann 225. 265.
Lokale Wirkung in Batterieen 161.
Ludwig XV 226.
Luftthermometer, elektr. 288.
Lullin 285.

Magnete,
— natürliche und künstliche 76. 77. 101. 326.
— Zerbrechen derselben 106.
— zusammengesetzte 95.
— Form derselben 101.
— Lamellen- 95. 107.
— Kraft derselben 103.
— Anfertigung derselben 92—98.
Magneteisenstein 76.
Magnetelektrizität 74. 391.
Magnetische Körper 85. 339.
Magnetische Wirkungen des Stromes 184. 318. 326. 327. 334.
Magnetisieren,
— lamellares 107.
— Methoden desselben 92—98. 326.
— eines Solenoids 107.
— Intensität desselben 313.
— mechan. Wirkungen desselben 113.
— Tönen desselben 113. 434.
— erfordert Zeit 324e.
Magnetisierungskoeffizient 89. 313. 340.
Magnetismus 76.
— permanenter 90. 313.
— temporärer 90. 102. 313.
— Erd- 88. 135.
— Residual- 102.
— eines Solenoids 107. 314.
— erzeugt durch Wärme 98.
— Zerstörung desselben 99.
— Verteilung desselben 104.
— Lamellar- 107.
— Gesetze über denselben 81. 116. 310.
— von Gasen 339. 387.
— Einfluss auf Licht 114. 387.
— Einheit desselben 125.
— Theorieen desselben 91. 115. 338.
Magnetkrystallische Kraft 343
Magnetnadel 79. 134.
Magnetograph 146.
Magnetometer 124. 146.
Magneto-optische Rotation 387.
Magnetpol 78. 122.

Digitized by Google

Mance'sche Methode 391.
Mascart 288. 308.
Maschine,
— elektrische 38.
— Konvektion-Induktions- 45.
— cylinderförmige 39.
— dynamo-elektrische 408.
— von Holtz 46.
— hydroelektrische 44.
— Erfindung der elektrischen 44.
— magnet-elektr. 407.
— Scheiben- 44.
— Winter'sche 40.
Matteucci 68. 230. 231.
Maxwell 32, 115. 192. 193. 250. 272. 305. 317. 318. 334. 337. 365. 390.
Maynooth s. Callan.
Mechanische Wirkungen
— der Entladung 43. 284.
— des Magnetisierens 113.
— bei dielektr. Körpern 272.
Medizinische Anwendungen der Elektrizität 232. 369.
Megohm 323.
Meidinger 176.
Meridian, magnet. 136.
Messungen,
— magnet 118. 325a.
— absolute 325a, 363. 364.
— elektrische 355. 363.
Metalle, magnet. 86. 339.
Metallochromie 432.
Mikrofarad-Kondensator 276.
Mikrophon 437.
Milliampère 323.
Mimosa 230.
Minotto 176
Molekulare Theorie der elektr. Wirkung 6.
Molekulare Wirkungen des Stromes 221.
Moment
— eines Kräftepaares 123.
— magnet 123 Anm. 313. 325a.
Morse Apparat 425.
Mühle, elektr. 43.
Müller 328.
Multiplikator 189.
Muskelzusammenziehung 229. 231.
Musschenbroek 52. 110.

Nadeltelegraph 424.
Napoleon III. 182.
Nebenschluss 202.
Negative El. 4. 300.
Newton 9. 38. 83. 103. 302.
Niaudet 173.
Nichtleiter 8.
Nobili 68. 231. 422.
Nord und Süd 81. 135.
Nordlicht 144. 145. 309.
Normalwiderstand s. Widerstand.
Nullmethoden 263.
Nullpotential 37. 239.

Oberflächen
— magnetische 310.
— gleichen Potentials 242. 310 f.
Oberflächendichte
— einer Laduug 35. 248.
— des Magnetismus 127. 311.
Oerstedt 184. 185. 191.
Ohm 179.
Ohm, das 323. 364.
Ohm'sches Gesetz 180. 345.
Optische Spannung
— elektrostatische 386.
— elektromagnet. 387.
Oscillation
— elektrische 295.
— Methode der 120 Anm. 120. 121. 122. 235. 325a.
Osmose, elektr. 222.
Ozon 208. 298. 302 Anm.

Page 113.
Paradoxon, magnetisches 128.
Parallele Ströme 332.
Paramagnetische Körper 339.
Passiver Zustand des Eisens 172 Anm.
Peltier 260. 303. 307. 380.
Perry s. Ayrton.
Pflanzen, El. derselben 69. 230.
Phosphoreszenz 292.
Photophon 389.
Physiologische Wirkungen 226. 287.
Pistole, elektr. 286.
Planté 304. 415.
Plattenförmiger Konduktor 354.
Plücker 343.
Poggendorff 165.
Poisson 343.
Pol, markierter 80.

Digitized by Google

Polarisation
— in Elementen 163. 414.
— des Voltameters 272. 413. 415.
— Mittel gegen dieselbe 165.
Polarisierte Relais 428.
Polarisiertes Licht 387.
Polarität, magnet. 82. 106. 115.
— diamagnet. 342.
Pole eines Magnets 78. 122.
— einer Volta'schen Batterie 154.
— von pyroelektr. Krystallen 66.
Poleinheit, magnet. 125.
Porret 222.
Positive Elektrizität 4. 300.
Potential, elektr. 37. 237. 239.
— magnet. 310. 314. 315. 318.
— zweier Ströme 319. 320.
— Abnahme des — längs eines Drahtes 263. 357.
Pouillet 199. 201.
Preece 305.
Primärer Konduktor 39.
Priestley 273.
Probe für schwache Ströme,
— chemische 218. 286.
— physiologische 229.
Protoplasma 231.
Pyroelektrizität 66.

Quadrantelektrometer 262.
Quadrantelektroskop 14.
Quellen der Elektrizität 10. 57.
Quetelet 308.
Quincke 224. 273. 386.

Reibung als Elektrizitäts-Quelle 1. 10.
Reis 434.
Relais 426.
Residuum
— einer Leydener Flasche 53. 272.
— eines Kabels 274. 430.
— eines Voltameters 272. 415.
— des Magnetismus 102.
Retentivität 90. 313.
Reymond, du Bois- 231.
Rheocord 356.
Rheometer 197 Anm.
Rheoskop 197 Anm
Rheostat 356.
Rheotrop 197 Anm.
Riess 35. 288 Anm. 291.
Ritchie 375.
Ritter 228. 230. 415.
Rollende Reibung 10.
Romagnosi 184.
de Romas 302.
Ronalds 423.
Rotation,
— elektromagnet. 335.
— Arago'sche 401.
Rowland 313. 337.
Rückschlag 26. 304.
Ruhmkorff 339. 398. 399.

Sägespähnbatterie 158. 176.
Säkulare Variationen 141.
Salze, Elektrolyse der 417.
St. Elmsfeuer 302 Anm.
Sanderson 231.
Sättigung, magnet. 102. 115 Anm. 328 e.
Säule, Volta'sche 150.
Schale, magnet. 107. 192. 311 h.
— Kraft derselben 127
— ihr Potential 127. 315.
Schatten, elektr. 293.
Schiesspulver, Entzündung des — 286. 288. 370.
Schirm, magnet. 84.
Schlag, elekt. 226.
— eines Stromes 226.
Schrift, magnet. 111.
Schutzring 248. 261.
Schweigger's Multiplikator 189.
Seebeck 379.
Sehen, das, vom Strome beeinflusst 228.
Seifenblase, elektrisierte 3.
Sekundäre Batterieen 178. 415.
Selbstabstossung eines Stromes 334.
Selbstinduktion 404.
Selbstverzeichnende Apparate 146. 288. 307.
Selen 389.
Serien, Aufstellung in — 171.
Siemens 272. 407. 409.
Silurus 68.
Sinusbussole 201.
Smee 165. 169.
Solenoid 314. 327.
Spaltung als Elektrizitätsquelle 60.
Spannung, dielektrische 56.
— elektrostatischer Kräfte 248 Anm.
Spezifische Induktionskapazität 21. 49. 268. 272.
Spezifischer Widerstand 348.

Digitized by Google

Spiegelgalvanometer 203.
Spitzen, Entladung an — 39. 42. 43. 249.
— Dichte der Ladung an — 35. 249.
Spottiswoode 294.
Sprengungen, elekt. 286. 370.
Stärke
— des Stromes 158. 179. 195. 196.
— eines Magnetpols 102.
— einer magnet. Schale 315.
Starrkrampf als Folge der Stromunterbrechung 230.
Stewart 144. 308.
Streifen in luftleeren Röhren 292. 294.
Strich, einfacher 92.
— getrennter 93.
— Doppel- 94.
Strom, Wirkungen des — 153.
— Verhältnis zu einem Magnet 184. 318. 326. 391.
— Energie des — 378.
— Wärme und Licht 366.
Stromakkumulator s. sekundäre Batterieen.
Strömende Elektr. 147.
Stromleiter 152.
— einfacher und zusammengesetzter 181.
— Verzweigung des — 353.
Stromplatten 340.
Stromstärke 158. 179.
— in magnet. Maass 195. 196.
— Einheit der — 196.
Stromwender s. Kommutator.
Sturgeon 326.
Sturm, magnet. 145. 309.
Sulzer 227.
Swammerdam 229.
Swan 374
Symmer 4.

Tait 63. 383.
Tangentenbussole 199.
Telegraph, elektr. 423.
— chemischer 218.
— Morse'scher 425.
— Nadelapparat 424.
Telegraphieren, Gegensprechen 428.
— Doppelsprechen 428.
— unterseeisches 429.
Telephon von Reis 434.
— von Dolbear 436.
— von Edison 436.
Telephon von Graham Bell 435.
— von Varley 272.
— Ströme des — 229.
Temperatur,
— ihr Einfluss auf Widerstände 183.
— von Widerständen beeinflusst 369.
Terquem 31.
Theorie
— der Elektr. 6. 300 (Vorrede).
— des Magnetismus 91. 115. 338.
— der Elektrolyse 414. 418.
Thermoelektrizität 70. 379.
Thermoelektr. Diagramm 383.
Thermo-elektromotorische Reihen 382.
Thermosäule 384.
Thompson 111. 300. 334. 390 Anm. 422.
Thomson, J. 73. 365.
Thomson, W. 45. 71. 81 Anm. 176. 202. 250. 261. 262. 272. 291. 295 Anm. 306. 307. 383. 431.
Tonapparat 425.
Töne, magnet. 113.
Torpedo 68. 218.
Torpedominen 286. 370.
Torsion vom Magnetisieren beeinflusst 113.
Torsionselektrometer, Torsionswage } 15. 119.
Totale Wirkung eines Magnets 325a.
Trägheitsmoment 325a.
Tragkraft
— der Magnete 103.
— der Elektromagnete 330.
Trockene Säule 182. 264.
Turmalin 66. 297. 390 Anm.
Tyndall 342. 343.

Uebertragung von Kräften 376.
Uhr, elektrische 433.
Umgekehrte Quadrate 16. 117. 235. 245.
Universalauslader 54.
Unterseeischer Telegraph 429.
Ure 229.

V, Werte von 365. 390.
Variation,
— säkulare 141.
— jährliche 143.
— tägliche 142.
— geographische 136.
Varley 272.

Digitized by Google

Verbrennung, als Elektr. Quelle 62.
Verdet 387.
Verdichten 61.
Verdoppler 23. 45.
Verdunsten als el. Quelle 63. 303.
— Entladung durch — 223.
Vergolden, elektr. 431.
Verlust der Ladung 15. 299.
Versuchsplatte 29.
— magnetische 402.
Verteilung der El. 28. 35. 248. 249.
— des Stromes 240.
— des Magnetismus 104. 122.
Verzögerung von Strömen in Kabeln 274 296 430.
Verzweigung des Stromleiters 353.
Vibration als el Quelle 59
Volt, das 323.
Volta 22. 62. 71. 72. 148. 149. 150. 151. 156. 228. 273 307.
Voltameter 214. 215. 216.
Volta'scher Bogen 371.
— Batterie 154. 167.
— Säule 150.
— Element 152.
Voltmeter 360d.

Wärme,
— Einfluss auf Magnete 99. 100.
— Einfluss auf Batterieen 183.
— — auf Leitungsfähigkeit 349.
Wärme, erzeugt
— durch Ströme 171. 366. 380.
— durch Magnetismus 113. 401.
— durch Funken 288.
— durch dielektr. Spannung 272.
— an den Elektroden 417.
Wasser, Elektrolyse des — 206 413.
Weber 336. 342.
Weber, das 323.
Wheatstone 290. 296. 358. 408. 423.
Widerstand 27 158. 179. 346.
— von Gasen 158. 348.
— der Luft 291. 325b.
— von Flüssigkeiten 158. 349.
— Messung des — 356.
— Gesetze über — 347.
— spezifischer 348.
— absolute Einheit des — 363. 364.
— als Geschwindigkeit 363.
— beeinflusst durch Licht 389.
— — durch Schall 436.
— — durch die Temperatur 349.
Widerstand, innerer
— eines Elements 181. 350.
— Messung desselben 361.
Widerstandsbrücke 358.
Widerstandsrolle 359.
Wiedemann 113. 339
Wiederverteilung einer Ladung 36.
Wilde 373 407.
Wind, elekt. 43.
Winkelberechnung 129. 133.
Wismut,
— diamagnet. Eigenschaften des — 87. 313. 339.
Wöhler 182.
Wollaston 169.
Wüllner 270.

Zamboni 13. 182. 264.
Zange zum Ausladen 51.
Zanotti 229.
Zerbrechen als el. Quelle 60.
Zerbrechen eines Magnets 106.
Zersetzung
— des Wassers 206. 413.
— der Alkalien 417.
Zitteraal 68. 218.
Zünder, elektr. 286. 370.

Digitized by Google

ZUSÄTZE

(nach der neuesten Auflage des Originals).

Zu Art. 313.

Der *Magnetisierungs-Koeffizient* (oder die magnetische Empfänglichkeit) basiert auf der Einheit der Polstärke. Angenommen, ein Magnet hätte an jedem Pole m magnetische Einheiten, so ergibt sich für die Intensität der Magnetisierung (vergl. Seite 288)

$$J = \frac{\text{Magnet. Moment}}{\text{Volumen}} = \frac{m \times l}{s \times l} = \frac{m}{s}$$

wo s den Querschnitt des überall gleich dicken Magnets bedeutet. Nehmen wir nun ferner an, dass diese Intensität der Magnetisierung von einem magnetischen Felde von der Intensität H herrühre, so finden wir, dass das Verhältnis der resultierenden Intensität der Magnetisierung J zu der sie erzeugenden magnetischen Kraft H sich numerisch durch einen Magnetisierungs-Koeffizienten k ausdrücken lässt, so dass

$$J = k \,.\, H \text{ oder } k = \frac{J}{H}.$$

In Worten lässt sich dies so ausdrücken, dass jeder magnetischen Kraftlinie des Feldes k magnetische Einheiten an der Polfläche entsprechen.

Die Werte von k für Eisen sind sehr verschieden, nicht nur für die verschiedenen Eisensorten, sondern auch in Bezug auf den Grad der Magnetisierung. Barlow fand für Eisen

Digitized by Google

k = 32,8; Thalen 32 bis 44; Archibald Smith 80 bis 90; Stoletow 21 bis 174; Rowland fand, dass k für Norwegisches Eisen bis 366 beträgt; Ewing für *dünne* Drähte aus weichem Eisen bis 1400. Stoletow wies nach, dass Eisen in einem schwachen magnetischen Felde einen geringen Magnetisierungs-Koeffizienten besass, der jedoch bedeutend zunahm, als die magnetisierende Kraft des Feldes verstärkt wurde, und wieder abnahm, als das Eisen gesättigt war. Bei Anwendung sehr starker magnetisierender Kräfte (d. h. für sehr grosse Werte von J), ist der Magnetisierungskoeffizient k in Wirklichkeit = 0. Für Eisen und Stahl ist der Maximalwerth von J wahrscheinlich 1500 (Einheiten pro Quadratzentimeter des Querschnitts). Nach Rowland beträgt das Maximum für Kobalt 800, für Nickel 494.

Der *Koeffizient der magnetischen Induktion* (oder die Permeabilität) basiert auf den Linien der magnetischen Induktion. Die Anzahl der magnetischen Kraftlinien, welche an einer bestimmten Stelle durch die Flächeneinheit des Querschnitts führen, heisst die »magnetische Induktion« jener Stelle; dieselbe wird bezeichnet durch den Buchstaben B. Das Verhältnis der magnetischen Induktion zu der sie erzeugenden magnetischen Kraft wird numerisch durch einen Induktionskoeffizienten μ ausgedrückt, so dass

$$B = \mu \,.\, H \text{ oder } \mu = \frac{B}{H}.$$

Dieser Koeffizient ist immer positiv; für den leeren Raum ist derselbe gleich 1; für Luft in der Paxis ebenfalls gleich 1; für magnetische Substanzen ist derselbe grösser als 1, für diamagnetische Körper etwas kleiner als 1. Der Leser kann sich in folgender Weise eine Vorstellung hiervon machen: Angenommen, eine gewisse magnetisierende Kraft wirke in einer bestimmten Richtung, so würde dies natürlich eine Induktion längs einer gewissen Anzahl von Kraftlinien zur Folge haben, und im leeren Raume würde die Anzahl dieser Kraftlinien numerisch die magnetisierende Kraft darstellen. Wäre jedoch das umgebende Medium mit Eisen angefüllt, so würde dieselbe

Digitized by Google

magnetisierende Kraft viel mehr Kraftlinien induzieren. Das Eisen besitzt eine Art multiplizierender Kraft oder eine spezifische induktive Kapazität oder Leitungsfähigkeit für magnetische Kraftlinien. Diese »Permeabilität« lässt sich leicht aus dem Magnetisierungskoeffizienten berechnen. Am Ende des Art. 312 wurde nachgewiesen, dass von jeder magnetischen Poleinheit 4π magnetische Linien ausgehen. Wenn also, wie oben bewiesen wurde, jede Kraftlinie des magnetisierenden Feldes k magnetische Einheiten erzeugt, so fügt das Eisen jeder Linie des Feldes noch $4\pi k$ Linien hinzu, d. h. μ hat den Wert $1 + 4\pi k$. Die Werte von μ nehmen in ähnlicher Weise wie die von k ab, wenn die Magnetisierung sich dem Sättigungspunkte nähert. Die folgende Tabelle enthält die Resultate der Untersuchungen von Stoletow und Bidwell.

H	k	J	μ	B
		Stoletow.		
0,43	21,5	9,24	275,6	118,5
0,44	30,5	13,45	390,5	171,8
3,20	174,0	556,6	2222,0	7113,0
30,6	39,4	1206,0	504,2	15427,0
		Bidwell.		
3,9	151,0	587	1899,1	7390
10,3	89,1	918	1121,4	11550
40,0	30,7	1226	386,4	15460
115,0	11,9	1370	150,7	17330
208,0	7,0	1452	88,8	18470
427,0	3,5	1504	45,3	19330
585,0	2,6	1530	33,9	19820

Nach Hopkinson beträgt die Induktion B für Gusseisen ungefähr 11,000 in einem Felde H = 220; die Residual-Induktion beträgt ungefähr 5000. Bosanquet fand als Maximalwert von B für Schmiedeeisen 16,800 bis 19,000; doch ist es ihm

Digitized by Google

gelungen, einen Stab aus Schmiedeeisen so stark zu magnetisieren, dass die Induktion in der Mitte des Stabes den Wert 29,388 erreichte. Merkwürdigerweise ist Stahl, welcher 12 Prozent Mangan enthält, nicht magnetisch. Hopkinson fand als Maximum seiner Induktion nur 310.

Zu Art. 326.

Henry war der erste, welcher nachwies, dass solche Elektromagnete, welche am entfernten Ende einer langen Telegraphenlinie arbeiten sollen, mit zahlreichen Windungen aus dünnem Drahte versehen werden müssen.

Zu Art. 327.

Für ein langes, gerades Solenoid ohne Eisenkern lässt sich die Intensität des vom Strome erzeugten magnetischen Feldes näherungsweise berechnen. Denn wie wir im Art. 319 gesehen haben, beträgt die Arbeit, welche an einem magnetischen Einheitspole verrichtet wird, wenn derselbe, den magnetischen Kräften entgegen, auf einer den Stromleiter n mal kreuzenden Bahn bewegt wird, $4\pi ni$ Erg, wobei der Strom i in absoluten Einheiten ausgedrückt ist (Art. 196). Da aber die an einem Einheitspole verrichtete Arbeit das magnetische Potential misst (Art. 310), so ist die Differenz des magnetischen Potentials zwischen den beiden Enden des langen Solenoids gleich $4\pi ni$. Aendert sich aber das magnetische Potential längs einer Linie, so ist die Aenderung des Potentials pro Längeneinheit ein Maass für die magnetische Kraft (Art. 310, e). Ist also l die

Digitized by Google

Länge des Solenoids in Zentimetern, so ist $\frac{4\pi ni}{l}$ die Intensität der magnetischen Kraft im Innern eines Solenoids. Da erstere gleichbedeutend mit der Intensität des magnetischen Feldes an jener Stelle ist, so können wir sagen, dass diese Zahl die Anzahl der magnetischen Kraftlinien pro Quadratzentimeter des Querschnitts des Solenoids darstellt. Bedeutet H die Intensität des auf diese Weise im Innern des Solenoids erzeugten Feldes und r den Radius der Windungen, so ist die gesamte Anzahl N der Kraftlinien, welche von einem Ende bis zum andern durch das Solenoid gehen, gleich $H \times \pi r^2$. Folglich:

$$H = \frac{4\pi ni}{l}$$

$$N = \pi r^2 \times \frac{4\pi ni}{l}.$$

Nach Art. 312 führen 4π magnetische Linien nach der magnetischen Einheit. Daher wirkt das Solenoid ebenso, als wenn es an seinen Polen die magnetische Menge

$$m = \frac{\pi r^2 ni}{l}$$

hätte. Ist der Strom in Ampère ausgedrückt, wofür wir C schreiben wollen, so haben wir zu berücksichtigen, dass 10 Ampère gleich einer absoluten Einheit sind (Art. 196), folglich $i = \frac{1}{10}$ C. Obige Formeln gehen dann über in:

$$H = \frac{4\pi}{10l} . C . n$$

$$N = \frac{4\pi^2 r^2}{10l} . C . n$$

$$m = \frac{\pi r^2}{10l} . C . n.$$

Man wird bemerken, dass die drei magnetischen Grössen H (innere magnetische Kraft), N (gesamte Anzahl der magnetischen Linien), und m (Polstärke) für jedes Solenoid von gegebener Länge und gegebenem Radius den Ampère des Stromes und der Anzahl der Windungen der Spirale proportional sind. Das

Digitized by Google

Produkt $C \cdot n$, welches in allen das Solenoid betreffenden Formeln vorkommt, wird häufig die Anzahl der Ampère-Windungen genannt.

Zu Art. 328.

Gesetz von Hopkinson.

Hopkinson hat nachgewiesen, dass man N auf ähnliche Weise berechnen kann, wie im Falle elektrischer Stromleiter. Wir können uns vorstellen, dass die Eisenkerne und die Armatur eines Elektromagnets mit dem dazwischen befindlichen Raume gewissermaassen einen magnetischen Stromleiter bilden, welcher von den magnetischen Linien durchschnitten wird. In derselben Weise, wie wir bei einem elektrischen Stromleiter aus der elektromotorischen Kraft und dem elektrischen Widerstande im Stromleiter die Stromstärke berechnen können, ebenso lässt sich bei einem magnetischen Stromleiter die Zahl N berechnen, wenn wir die magnetomotorische Kraft (oder das Linien-Integral der magnetisierenden Kräfte, welche längs des Stromleiters wirken) und die verschiedenen Widerstände der einzelnen Teile des Stromleiters kennen. Nun ist die magnetomotorische Kraft (vergl. Art. 319 d) gleich $\frac{4\pi C n}{10}$. Der magnetische Widerstand eines magnetischen Konduktors ist seiner Länge direkt, seinem Querschnitte und seiner »Permeabilität« umgekehrt proportional. Angenommen, wir hätten einen magnetischen Stromleiter, welcher aus 3 Teilen bestände, einem gebogenen Eisenkern, dessen Länge, Querschnitt und »Permeabilität« resp. gleich l_1 s_1 und μ_1 wäre; einer Armatur, für welche wir die Werte l_2 s_2 μ_2 hätten, und zwischen jenen 2 mit Luft erfüllte Räume, von der Länge l_3 (vom Eisen zum Eisen gerechnet) und von dem Querschnitt s_3 (gleich der Polfläche). Da die »Permeabili-

Digitized by Google

tät« der Luft = 1, so sind die Widerstände dieser 3 Teile resp.

$$\frac{l_1}{s_1\mu_1}\,;\quad \frac{l_2}{s_2\mu_2}\,;\quad \frac{2l_3}{s_3}\,.$$

Dividiren wir nun die magnetomorische Kraft durch den gesamten magnetischen Widerstand, so ergibt sich:

$$N = \frac{4\pi C n}{10\left(\frac{l_1}{s_1\mu_1} + \frac{l_2}{s_2\mu_2} + \frac{2l_3}{s_3}\right)}$$

und dies ist die Anzahl magnetischer Linien des Magnets, ausgedrückt durch die erregenden Ampère-Windungen. Es ist jedoch notwendig, dass wir die Werte von μ für die verschiedenen Eisensorten und für die verschiedenen Grade des Magnetisierens kennen. Hopkinson machte von dieser Formel eine nützliche Anwendung bei Berechnungen dynamo-elektrischer Maschinen. Analoge Formeln haben Rowland und Kapp angewendet.

Zu Art. 329.

Man hat mancherlei besondere Formen des Elektromagnets für besondere Zwecke erfunden. Um eine äusserst kräftige Anziehung auf sehr kurze Entfernungen zu erzielen, benutzt man am besten einen kurzen cylinderförmigen Elektromagnet, welcher von aussen mit einer eisernen Röhre umgeben ist, die unten durch Eisen mit dem Eisenkerne in Verbindung steht. Gebraucht man einen recht schnell wirkenden Magnet, so lege man die Spiralen nicht um den ganzen Eisenkern, sondern bloss um die Pole. Als Regel merke man, dass die eisernen Teile, einschliesslich der Armatur, so vollkommen wie möglich einen geschlossenen magnetischen Stromleiter bilden. Der Querschnitt der Armatur muss grösser sein, als der der Eisenkerne.

Digitized by Google

Zu Art. 337.

Der Verfasser dieser Vorlesungen (und gleichzeitig mit ihm auch Righi) hat nachgewiesen, dass diejenigen Metalle, bei denen die Hall'sche Wirkung statt hat, eine Aenderung ihres elektrischen Widerstandes erleiden, wenn man dieselben in das magnetische Feld bringt.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google